



**DORA LETÍCIA SILVA
FONSECA**

**ACOPLAMENTO DO WRF A UM MODELO DE
RADIAÇÃO SOLAR DE CÉU LIMPO**

**COUPLING BETWEEN WRF AND A CLEAR SKY
SOLAR RADIATION MODEL**



**DORA LETÍCIA SILVA
FONSECA**

**ACOPLAMENTO DO WRF A UM MODELO DE
RADIAÇÃO SOLAR DE CÉU LIMPO**

**COUPLING BETWEEN WRF AND A CLEAR SKY
SOLAR RADIATION MODEL**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Alfredo Rocha, Professor Associado com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e Engenheiro Rui Pereira, MEGAJOULE inovação.

o júri / the jury

presidente /
president

Prof. Doutor José Manuel Henriques Castanheira
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais /
examiners committee

Prof. Doutora Liliana do Carmo Santiago Fernandes Amado Caramelo
Professora auxiliar da Universidade de Trás dos Montes e Alto Douro

Prof. Doutor Alfredo Moreira Caseiro Rocha
Professor associado com agregação da Universidade de Aveiro

agradecimentos / acknowledgements

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Alfredo Rocha pela compreensão, partilha do seu conhecimento, boa disposição e pela orientação da tese de mestrado juntamente com o Engenheiro Rui Pereira, a quem também agradeço a ajuda, prontidão na resposta dos meus pedidos e conselhos ao longo da realização do trabalho. O meu agradecimento e admiração.

Ao Tiago Luna pela constante disponibilidade, apoio informático prestado, fornecimento dos dados provenientes do WRF, assim como na ajuda da compreensão do funcionamento deste.

À minha turma de mestrado, pela amizade, ajuda, partilha de ideias, auxílio e serenidade transmitida durante todo o mestrado. Muito obrigada!

A toda a minha família, pelo apoio incondicional, motivação, incentivo e pelo esforço realizado, que permitiu a concretização deste trabalho. Aos meus amigos e ao João Matias, pelo apoio, simpatia e bom humor ao longo de todo o meu percurso académico.

palavras-chave

Radiação Solar, Parametrizações, WRF, modelos de decomposição, radiação global horizontal

resumo

A radiação solar, para além de ser responsável pelas condições meteorológicas e circulações oceânicas, adquire uma nova importância como fonte de energia renovável. Para tal, é necessário quantificar este recurso recorrendo a dados observados ou a dados simulados. Os modelos têm sido essenciais nessa medida, proporcionando dados de irradiância para locais onde existe ausência de medições. Os modelos meteorológicos numéricos de mesoescala, como o WRF, permitem uma previsão de dados de radiação, mas não com o detalhe espacial e temporal por vezes necessário. Uma alternativa consiste no acoplamento entre modelos meteorológicos de mesoescala e modelos locais de radiação. Com este trabalho pretende-se testar a sensibilidade a diferentes resoluções de malha e parametrizações do modelo WRF, com o objetivo de sugerir uma configuração padrão para alimentar um modelo de radiação solar de céu limpo de alta resolução, fazendo uso de técnicas de decomposição da radiação solar. Para otimização da configuração WRF são utilizados dados de radiação solar global, na horizontal, provenientes de estações localizadas na ilha do Corvo (Açores) e Madeira. Calcularam-se várias medidas estatísticas. Os resultados mostraram que o modelo decomposição da radiação solar com a melhor prestação é o modelo DIRINT. Dos esquemas de parametrização testados, os esquemas GWG e DEK, aparentam ser mais robustos. Entre estas combinações não é apresentada uma melhor prestação, variando em função do período em estudo e domínio. Contudo, para a ilha do Corvo, a combinação DEK apresenta um bom resultado para o mês de Outubro, no domínio D03 e pior para o mês de Julho. Para as estações da ilha da Madeira a melhor prestação é apresentada pelo mês de Março, na estação da Bica da Cana. Outra conclusão mostrada pelos resultados é que a estação localizada na zona rural e numa maior altitude apresenta melhores resultados. Observando-se que não há um conjunto de esquemas de parametrização e uma resolução de malha que seja o melhor para todas as situações.

keywords

Solar Radiation, parameterization, WRF, decomposition models, horizontal global radiation

abstract

The solar radiation, aside from being responsible for meteorological conditions and ocean circulations, has also acquired a newfound importance as a renewable energy source. As such, a quantification of this resource is necessary using either observed or simulated data. Models have thus become increasingly important, as they generate irradiance data for places where measurements are lacking. Mesoscale numerical weather prediction models, such as the WRF, can be used to predict radiation data, but not always with enough spatial and temporal detail. An alternative consists of coupling different mesoscale meteorological models with local radiation models. This study aims at testing WRF's sensibility to different grid resolutions and parameterizations, with the goal of suggesting a standard configuration to feed a high resolution clear sky solar radiation model, through the use of solar radiation decomposition techniques. In order to optimize the WRF configuration, horizontal fields of global solar radiation data from measuring stations in the Corvo Island (in Azores) and Madeira were used. Several statistical measures were computed. The results showed that the solar radiation decomposition model with the best performance is the DIRINT model. From the tested schemes, the GWG and DEK schemes appear to be the most robust. Among these combinations, an overall best performance is not presented, as results vary according to the time period at study and the spatial domain. Nevertheless, for the Corvo Island, the DEK combination shows a good result for the month of October, for the D03 domain, but with worse results for the month of July. For the Madeira Island, the best performance is recorded for the month of March, at the Bica da Cana station. This study has also shown that the station located in the rural area and at a higher altitude has the best results. It was observed that there is no set of parameterization schemes or a grid resolution that is the best for every situation at study.

Índice

Capítulo 1 . Introdução	1
1.1 Objetivo e estrutura da tese	3
Capítulo 2 . Revisão Bibliográfica	5
2.1 Radiação Solar	5
2.1.1 Transferência radiativa	7
2.2 Modelos de radiação solar de céu limpo	8
2.2.1 Modelos de decomposição	10
Capítulo 3 . Dados e Métodos	13
3.1 Descrição do modelo	13
3.2 Simulações	16
3.2.1 Açores	17
3.2.2 Madeira	17
3.2.3 Variáveis de saída	18
3.3 Configurações físicas e numéricas	18
3.4 Observações	18
3.5 Métodos	21
3.5.1 Medidas de erros	21
3.5.2 Teste Kolmogorov-Smirnov	22
3.5.3 Funções de Probabilidade	22
Capítulo 4 . Resultados	23
4.1 Modelos decomposição	23
4.2 Esquemas de Parametrização	29
4.2.1 Parte 1	31
4.2.2 Parte 2	34
4.3 Comparação entre estações	42
4.4 Comparação entre formulações de céu limpo (ESRA vs SOLIS simplificado)	43
Capítulo 5 . Conclusão	45
Referências	47

Lista de Figuras

Figura 1: Radiação global média diária para o período 1986-2005 para (a) o Corvo (Açores) - latitude de 39.7°N e longitude de 31.1°W (ESQUERDA) e (b) Madeira (Funchal) - latitude de 32.7°N e longitude de 16.9°W (DIREITA), ambos com albedo igual a 0.2. Dados obtidos em <i>Meteonorm 7</i> (http://meteonorm.com/)	3
Figura 2: Componentes da radiação solar sobre superfícies de intercepção. Fonte: Badescu, 2008.....	6
Figura 3: Comparação entre os modelos propostos pelos autores Rigollier et al. (2000): Bc_§2 diz respeito ao modelo que faz uma estimativa instantânea e Bc_§3 ao modelo que estima energia acumulada num período, para o cálculo da irradiância horizontal direta para céu limpo. Fonte: Rigollier et al. 2000.	9
Figura 4: Representação esquemática do acoplamento do modelo numérico WRF e o modelo de radiação solar de céu limpo. Fonte: Pereira, 2013.	16
Figura 5: Os três domínios aninhados usados no modelo WRF para a (a) ilha dos Açores e (b) a ilha do Funchal. Representação realizada em Matlab, utilizando scripts disponíveis em M_Map: A Mapping package for Matlab	16
Figura 6: Locais em estudo, arquipélago dos Açores e da Madeira, fonte: Google Earth.	19
Figura 7: Diagrama de Hovmöller da radiação global (W/m^2) medida, para as estações (a) Corvo, (b) LREC e (c) Bica da Cana, respectivamente. Para os meses de Outubro 2011, Março 2012 e Julho 2012 para o Corvo (a). Para a ilha da Madeira, LREC (b) e Bica da Cana (c), os meses apresentados são: Janeiro 2011, Março 2011, Julho 2011 e Outubro de 2011.....	20
Figura 8: Representação das medidas de erro no diagrama de Taylor, para o domínio D03 (esquerda) e o domínio D02 (direita), Outubro de 2011 (a) e (b), Março de 2012 (c) e (d) e Julho de 2012 (e) e (f) para a estação do Corvo	24
Figura 9: Histogramas (lado esquerdo) e distribuição cumulativa (lado direito) da irradiância (W^2/m), para o mês de Outubro, para o domínio D03 (em cima) e D02 (em baixo). Modelo DIRINT e combinação DEK.	26
Figura 10: Valores médios diários da irradiância para os valores simulados (laranja) e medidos (azul), para Março (a) e Julho (b), modelo DIRINT para o domínio de menor dimensão (D03).	27
Figura 11: Representação de Kt em função da elevação solar para o mês de Outubro para o domínio D03 (a) e para o domínio D02 (b).	28
Figura 12: Representação das medidas de erro no diagrama de Taylor, para o domínio D03, no período 17 a 18 de Janeiro 2011, para a estação do LREC (a) e a estação da Bica da Cana (b).....	31
Figura 13: Representação das medidas de erro no diagrama de Taylor, para o domínio D03, no período 24 e 25 de Março 2011, para a estação do LREC (a) e a estação da Bica da Cana (b)	32
Figura 14: Representação das medidas de erro, no diagrama de Taylor, para o domínio D03, no período 18 a 19 de Julho 2011, para a estação do LREC (a) e a estação da Bica da Cana (b)	32
Figura 15: Representação das medidas de erro no diagrama de Taylor, para o domínio D03 (em acima) e para o domínio D02 (em baixo) no período 7 e 8 de Outubro 2011, para a estação do LREC (esquerda) e a estação da Bica da Cana (direita)	33
Figura 16: Representação das medidas de erro no diagrama de Taylor, para as combinações DEK e GWG, para ambos os domínios, mês de Janeiro (a) e (b), Março (c) e (d), Julho (e) e (f) e por fim	

Outubro (g) e (h) do ano 2011 para a estação do LREC (esquerda) e a estação da Bica da Cana (direita)	35
Figura 17: Valores médios diários da irradiância para os valores simulados (laranja) e medidos (azul) obtidos na estação do LREC, para o mês de Janeiro (esquerda), para a combinação DEK (a) e GWG (c) e para o mês de Julho (direita) para a combinação DEK (b) e GWG (d), para o domínio D03	37
Figura 18: Representação de Kt em função da elevação solar para o mês de Julho, domínio D03 e a combinação DEK.	38
Figura 19: Histograma da irradiância (W^2/m), para o mês de Janeiro, domínio D03 (a) e D02 (b), estação do LREC para a combinação DEK (laranja) e GWG (azul escuro).	38
Figura 20: Valores médios diários da irradiância para os valores simulados (laranja) e medidos (azul) obtidos na estação da Bica da Cana, para o mês de Março para a combinação DEK (a) e GWG (b) no domínio D03.	40
Figura 21: Representação de Kt em função da elevação solar para o mês de Março, domínio D03 e a combinação DEK.	40
Figura 22: Histograma da irradiância (W^2/m), para o mês de Março, domínio D03, ambas as combinações (DEK (laranja) e GWG (azul escuro)) para a estação da Bica da Cana.	41
Figura 23: Valores médios diários da irradiância para os valores simulados (laranja) e medidos (azul) obtidos na estação do LREC, para o mês de Outubro, para a combinação DEK e o domínio D03 (a) e para o domínio D02 (b).	42
Figura 24: Valores médios diários da irradiância para os valores simulados (laranja) e medidos (azul) obtidos na estação do Corvo, para o mês de Julho, para a combinação DEK e o domínio D03, para a formulação ESRA (a) e para a SOLIS (b).	43

Lista de Tabelas

Tabela 1: Conjunto de esquemas de parametrizações utilizados nas simulações para o Corvo (LSM: Noah (Chen and Dudhia, 2001); LW: <i>Rapid Radiative Transfer Model</i> (RRTM) (Mlawer et al., 1997); SL: MM5 Monin-Obukhov scheme (M&O); PBL: YSU (Yonsei University) (Hong et al., 2006)).....	17
Tabela 2: Conjunto de esquemas de parametrizações utilizado na realização das simulações para o Funchal, para as simulações com o período de 2 dias.....	17
Tabela 3: Conjunto de esquemas de parametrizações utilizado na realização das simulações para a Madeira, nas simulações mensais	17
Tabela 4: Localização das estações de medição da radiação solar global.	18
Tabela 5: Valores médios mensais das simulações para o domínio D03 obtida para os 3 modelos de decomposição da radiação e das medições para a estação localizada no Corvo.	23
Tabela 6: Valores médios mensais das simulações para o domínio D02 obtida para os 3 modelos de decomposição da radiação e das medições para a estação localizada no Corvo.	23
Tabela 7: Resultados das medidas de erro, com um passo temporal de 10 min, da estação do Corvo, para o modelo de decomposição DIRINT para o domínio D03 e esquema de combinação DEK.	25
Tabela 8: Resultados das medidas de erro, com um passo temporal de 10 min, da estação do Corvo, para o modelo de decomposição DIRINT para o domínio D02 e esquema de combinação DEK.	25
Tabela 9: Resultado das medidas de erro, com um passo temporal de 1 hora, da estação do LREC, para a combinação DEK e domínio D03.	36
Tabela 10: Resultado das medidas de erro, com um passo temporal de 1 hora, da estação do LREC, para a combinação GWG e domínio D03.....	36
Tabela 11: Resultado das medidas de erro, com um passo temporal de 1 hora, da estação da Bica da Cana, para a combinação DEK e domínio D03.....	39
Tabela 12: Resultado das medidas de erro, com um passo temporal de 1 hora, da estação da Bica da Cana, para a combinação GWG e domínio D03.....	39
Tabela 13: Médias mensais da irradiância para o mês de Outubro e o erro médio (sem exclusão de valores noturnos), no domínio D03, das três estações (Cadência de amostragem de 10 min para o Corvo e para as estações localizadas na ilha da Madeira é horaria).	42
Tabela 14: Resultados das medidas de erro, para o domínio D03, modelo DIRINT, combinação DEK na estação do Corvo com as duas formulações (ESRA e SOLIS simplificado)	43

Lista de Acrónimos

AM – Massa de ar

AM2 – Massa de ar dois

BRL – Modelo BRL (Boland-Ridley-Lauret)

CP – Cumulus parametrization

DEK – Combinação dos esquemas de parametrizações: radiação de onda curta - Dudhia, de microfísica, Eta e de cumulus, Kain- Fritsch.

DHI – Irradiância Difusa

DIRINT- Modelo Dirint - Perez Diffuse model (Based on Look-Up tables) correction of the DISC model of Maxwell 1987

DNI – Irradiância Direta

DWG – Combinação dos esquemas de parametrizações: radiação de onda curta - Dudhia, de microfísica, WSM6 e de cumulus, Grell-Devenyi

DWK – Combinação dos esquemas de parametrizações: radiação de onda curta - Dudhia, de microfísica, WSM6 e de cumulus, Kain- Fritsch.

ECMWF - European Centre for Medium-Range

ESRA – Atlas Europeu de Radiação Solar

GHI – Irradiância Global horizontal

GWG – Combinação dos esquemas de parametrizações: radiação de onda curta - Goddard, de microfísica, WSM6 e de cumulus, Grell-Devenyi

Kt – Índice de claridade

LREC – Laboratório Regional de Engenharia Civil

LSM – Land Surface Model

LW- Longwave radiation

MACC - Monitoring Atmospheric Composition and Climate

MB – Diferença entre as médias

MLB – Relação modificada de Lambert-Beer

MP – Microphysics

PBL – Planetary boundary layer

R – Coeficiente de correlação

Re.SunTM – Solar Modelling based on Coupling Techniques With Mesoscale Simulations

rMB - Diferença entre as médias relativo

RMS – Erro quadrático médio

rRMS - Erro quadrático médio relativo

rSTD – Desvio Padrão do erro relativo

RTM- Modelo de transferência radiativa

S – Desvio Padrão dos dados simulados

S&O – Modelo Skartveit and Olseth

SL – Surface layer

S_{obs} - Desvio Padrão dos dados observados

SOLIS – Esquema de irradiância solar

STD – Desvio Padrão do erro
SW – Shortwave radiation
SWDOWN - downward shortwave flux at ground surface
TL - Fator de turbidez de Linke
TSI – Irradiância total solar
WRF - Weather Research Forecast

Lista de Símbolos

θ_z - Ângulo zenital

δ - Declinação solar

φ - Latitude do local

ω - Ângulo horário

ϕ - Elevação solar

Capítulo 1 . Introdução

A radiação solar é o principal fator do clima (Peixoto, 1981). É a força motriz de muitos processos físicos e químicos que ocorrem em todas as componentes do sistema climático (atmosfera, hidrosfera, criosfera, litosfera e biosfera), responsáveis pelas condições meteorológicas e circulações oceânicas. Da radiação solar que chega ao topo da atmosfera, apenas uma fração vai atingir a superfície terrestre, devido aos processos que advêm na propagação, tais como, a reflexão, a difusão, difração, absorção e refração. No caso da absorção da radiação solar, esta promove o aquecimento desigual da atmosfera, sendo a causa da circulação geral da atmosfera e consequentemente indução da circulação dos oceanos. Devido ao atual crescimento tecnológico, aumenta a necessidade de uma grande disponibilidade de energia elétrica e consequentemente, o aumento do número de aplicações da energia solar em fontes de geração de energia. Assim, a radiação solar adquire uma nova importância. Desta forma, aumenta também a necessidade de um conhecimento da distribuição/disponibilidade da radiação solar em superfície. Contudo devido à escassez de dados medidos de radiação em superfície, recorre-se ao uso de modelos para estimar a irradiância/radiação solar. Mas a estimativa da radiação solar é complexa porque, apesar da radiação solar que atinge o topo da atmosfera ser uma quantidade muito constante no tempo (varia ligeiramente ao longo do ano), aquela que atinge a superfície da Terra é variável. Isto deve-se, em grande parte, à variabilidade espaço - temporal de gases, nuvens e poeiras presentes na atmosfera, que absorvem, dispersam e reflectem a radiação (Badescu, 2008). Para prever a produção máxima de eletricidade de um sistema solar fotovoltaico para um determinado dia e local são necessários dados de irradiância. Os modelos de radiação têm sido essenciais nessa medida, proporcionando dados de irradiância para locais onde existe ausência de medições. É importante a distinção de algumas designações, quando nos referimos a radiação solar. Diferenciar entre termos que expressam uma quantidade de energia e aqueles que indicam uma taxa de energia. Na literatura, a radiação solar que chega à superfície é denominada por irradiação, insolação, radiação, irradiância, radiância, fluxo radiante, etc. Tanto a irradiação como insolação são ambos usados na quantificação da energia que chega à superfície num determinado período de tempo. Literalmente, simplesmente irradiação é a designação da radiação que chega a uma superfície, sendo ou não radiação solar (podendo ser empregada no sentido genérico), enquanto irradiância indica a taxa de energia solar que chega a superfície por unidade de tempo e por unidade de área, ou seja, é o mesmo que densidade de fluxo. Portanto, irradiância tem como unidade Wm^{-2} e irradiação as unidades $\text{kJm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ou $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ (Iqbal, 1983). Em suma, dados precisos de irradiação solar não são apenas importantes para a avaliação da força radiativa do sistema climático, mas também necessários para uma eficiente avaliação de qualquer sistema energético que requeira dados de irradiação como entrada.

A detecção remota por satélite geostacionários, para além, de permitir uma previsão de tempo, permite uma estimativa da radiação solar, porque satélites geostacionários fornecem informações da cobertura de nuvens, em alta resolução espacial e temporal. O conhecimento da radiância refletida pelas nuvens é estimado com base no cálculo de irradiância transmitida. Por outro lado, também fornece um conhecimento detalhado dos parâmetros atmosféricos envolvidos na dispersão e absorção da radiação solar. Ou seja, o processamento adequado desses dados oferece informações úteis para a elaboração de índices de radiação solar. O método mais conhecido, seguramente que é o método

Heliosat (Cano et al., 1986), introduzido pela equipa da Universidade de Oldenburg. Este converte os dados de irradiância provenientes do satélite METEOSAT com uma melhor precisão do que interpolação de dados medidos em superfície (Zelenka et al., 1999; Perez et al., 1998). Segundo os autores Rigollier et al. (2000), o fator de turbidez de Linke é um ponto-chave nos modelos para o cálculo da irradiância, representando uma função da dispersão por aerossóis, absorção de gases e vapor de água. Estes fazem a descrição do modelo de céu limpo proposto para a elaboração do Atlas Europeu da Radiação Solar (ESRA) que utiliza o método Heliosat. Contudo, o método Heliosat não esgota toda a informação que advém do lançamento de novo satélite promovendo o desenvolvimento de novas variantes deste método. O lançamento do satélite METEOSAT de segunda geração (MSG) aumentou o refinamento na modelação da irradiância, devido à utilização de todas as capacidades dos sensores disponíveis neste satélite e desenvolvimento de um novo modelo clear-sky, SOLIS - Esquema Solar Irradiância (Mueller et al., 2004). O modelo SOLIS é baseado no uso integrado de um modelo transferência radiativa (RTM) através da relação de Lambert-Beer. A integração do RTM para sistemas de cálculo está associada à possibilidade do uso de informação avançada do estado atmosférico e, portanto, melhorar a precisão do cálculo da irradiância.

Por outro lado, os modelos de previsão numérica da atmosfera, como o WRF (*Weather Research Forecast*), por si só, permitem uma previsão de dados de radiação para um determinado tempo e área, porém, não com o detalhe espacial e temporal por vezes necessário. A variável de saída do WRF de interesse é a radiação solar global à superfície (*downward shortwave flux at ground surface* - SWDOWN) que consiste na irradiância à superfície resultante da soma da radiação direta e difusa. Existem muitos processos físicos de escala inferior à resolução do modelo que não podem ser resolvidos pelas equações dinâmicas pelo que têm de ser parametrizados. O modelo WRF tem um conjunto de esquemas de parametrizações de vários processos, nomeadamente a interação da radiação com a atmosfera. Tendo em conta os principais controladores climáticos de um local em estudo devem ser escolhidos os esquemas de parametrização que descrevem melhor a realidade.

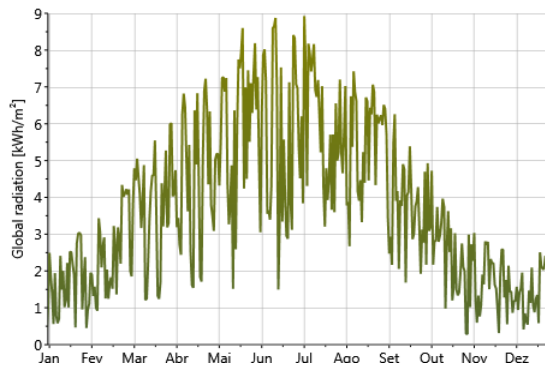
Uma alternativa para obtenção de dados de irradiância com maior detalhe é o recurso ao acoplamento entre os modelos, modelo de radiação solar em céu limpo com o modelo de previsão numérica meteorológica. Desta forma, o acoplamento permite:

- A garantia de uma modelação mais avançada da radiação solar, visto que o modelo de previsão numérica de tempo está em constante desenvolvimento.
- Contabilização de interações terreno-atmosfera de várias características (por exemplo, orográficos, gases atmosféricos, aerossóis, fenómenos climáticos e microfísica) (Pereira, 2013).
- A avaliação dos recursos solares para aplicações energéticas em todo o mundo com mais detalhe.

Todavia, são necessárias medições em superfície que, para além de permitirem uma comparação com o objetivo de validar as simulações do modelo, permitirão efetuar testes de sensibilidade aos diferentes esquemas de parametrizações e resoluções da malha.

Em Portugal, existe grande disponibilidade de radiação solar em comparação com o resto da Europa Norte. Contudo, a proximidade do mar (principalmente, Açores e Madeira), exercem uma influência significativa, aumentando a quantidade de nuvens presentes e reduzindo a intensidade da radiação solar à superfície. Mas, para além disso, a latitude também têm forte influência.

(a)



(b)

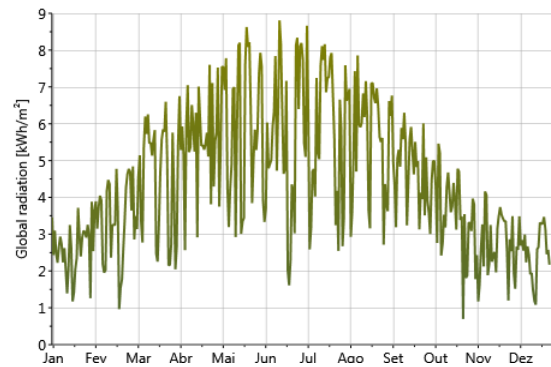


Figura 1: Radiação global média diária para o período 1986-2005 para (a) o Corvo (Açores) - latitude de 39.7°N e longitude de 31.1°W (ESQUERDA) e (b) Madeira (Funchal) - latitude de 32.7°N e longitude de 16.9°W (DIREITA), ambos com albedo igual a 0.2. Dados obtidos em *Meteonorm 7* (<http://meteonorm.com/>)

Quanto menor a latitude, menor é a inclinação dos raios solares e consequentemente maior radiação solar. É o caso das ilhas, Açores e Madeira, onde a diferença principal entre estes dois locais é a latitude. Na figura 1, verifica-se que a estação localizada na Madeira tem maior radiação global nos meses de Novembro a Fevereiro, comparativamente à estação localizada na ilha dos Açores, devido a maior incidência dos raios solares e uma menor amplitude de variação da radiação solar ao longo do ano. A Madeira tem uma altitude média superior, facultando uma vertente voltada para sul (local da estação) que tem um maior período de exposição aos raios solares. A variação da radiação global ao longo do ano na Madeira é menor comparada com a dos Açores.

1.1 Objetivo e estrutura da tese

Com este trabalho pretende-se testar a sensibilidade na simulação da radiação solar a diferentes resoluções de malha e parametrizações do modelo atmosférico WRF. Tem-se como objetivo sugerir uma configuração padrão as simulações WRF que servirão para alimentar um código de simulação da radiação solar de alta resolução baseado em técnicas de acoplamento dinâmico com simulações de mesoescala (Re.SunTM).

É feita uma revisão bibliográfica no capítulo 2, iniciando-se pela apresentação de alguns conceitos necessários para uma estimativa detalhada da radiação solar. Posteriormente são referidos alguns trabalhos realizados no âmbito da estimativa da radiação solar em céu limpo. Foram facultados dados de radiação solar global, na horizontal, provenientes de estações de medição localizadas na ilha do Corvo (Açores) e Madeira, para auxílio à definição da configuração padrão. Os dados e métodos utilizados para execução e validação do modelo são descritos no capítulo 3. No capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados obtidos. Por fim, as conclusões do trabalho são expostas no capítulo 5.

Capítulo 2 . Revisão Bibliográfica

2.1 Radiação Solar

A radiação solar representa a energia radiante emitida pelo Sol, de natureza eletromagnética. As várias formas de radiação compõem o espectro eletromagnético. A extensão do espectro vai desde ondas de curto comprimento e de muito alta frequência (raios gama) a ondas de alto comprimento (ondas de rádio). Aproximadamente metade da energia é emitida na luz visível, que corresponde a uma pequena faixa do espectro, entre aproximadamente 390 nm até 770 nm. Na terminologia de energia solar, a maior parte da radiação solar é considerada dentro da gama de curto comprimento, sendo o limite superior considerado entre 3 a 4 μm . Portanto, a radiação em comprimentos de onda superiores a 4 μm pode ser denominada de radiação de onda longa. A radiação de onda longa emitida pela terra e sua atmosfera é muitas vezes chamada de radiação terrestre (Iqbal, 1983). O fluxo solar total em todos os comprimentos de onda, que atinge o topo da atmosfera (TOA) numa superfície perpendicular aos raios solares, quando a Terra se encontra à distância média Terra-Sol, designa-se Constante Solar e tem um valor de aproximadamente 1367 W/m^2 (Rigollier et al., 2000), não é mais que a irradiância solar total (TSI). A radiação solar ao atravessar a atmosfera vai sofrer dispersão e absorção e, por este, motivo apenas uma fração da radiação incidente no TOA chega à superfície. Geralmente ao meio-dia de um dia de céu limpo, cerca de 25% da radiação solar que chega ao topo da atmosfera é dispersada e absorvida ao passar através da atmosfera. Para além disso, a radiação no topo da atmosfera não é a mesma em todas as latitudes e varia no decurso do ano. A distribuição é condicionada por fatores astronómicos e geográficos (Peixoto, 1981). A irradiância direta normal (DNI) é a radiação solar disponível através de um plano perpendicular à direcção do sol (de particular interesse para energia solar concentrada). Da dispersão, a parte que é desviada para a terra é designada de irradiância difusa (DHI) (resultante da diferença entre a radiação global e a radiação direta incidente no plano). Badescu (2008), define radiação global, como sendo o fluxo total de radiação sobre uma superfície horizontal. Assim, irradiância global horizontal (GHI) recebida por uma superfície é uma combinação da radiação direta e difusa. Esta é a quantidade da radiação solar que é medida, a GHI, em W/m^2 , e é dada pela seguinte relação (Paltridge and Proctor, 1976):

$$GHI = DNI \times \cos(\theta_z) + DHI \quad (2.1)$$

Onde θ_z é ângulo zenital (radianos), definido como sendo o ângulo entre a direcção dos raios incidentes e a normal a um plano horizontal.

Existem outras relações de modelos simples de céu limpo, descritas em Reno et al. (2012), sendo equação 2.1, a equação básica que relaciona as componentes da radiação solar e é fundamental para a calibração de instrumentos de radiação solar. Ao meio- dia (hora solar), em ambos os equinócios de primavera ou outono, o ângulo zenital é igual à latitude do local (φ), em graus:

$$\theta_z = \varphi \quad (2.2)$$

O ângulo zenital para qualquer data, hora e local é dado por:

$$\cos(\theta_z) = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad (2.3)$$

Onde, ω é ângulo horário (graus) e δ a declinação solar dada declinação solar dada por:

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (n + 284)\right) \quad (2.4)$$

Onde n é o dia juliano do ano.

A radiação refletida é adicionada quando temos uma superfície inclinada e as superfícies envolventes são refletoras. Contudo, esta contribuição é reduzida (Marion et al., 1992). Desta forma, a equação (2.1) tem de ser reescrita, considerando também a componente radiação refletida. A figura 2 ilustra as diversas componentes da radiação solar numa superfície. As características dos raios solares que chegam a uma superfície, advêm em grande parte da atmosfera que tem que atravessar. A atmosfera sem nuvens também contém, por exemplo, poeiras, aerossóis, que reduz a intensidade da radiação solar (figura 2).

O comprimento do caminho ao longo da atmosfera ou massa de ar (AM) percorrido pelos raios solares é mensurado pela quantidade de atmosfera que os fotões solares atravessam e depende da posição solar relativa ao observador. Quanto maior o comprimento através da atmosfera, mais radiação é absorvida e consequentemente menos DNI. Assim, a probabilidade de aumento da dispersão aumenta com o aumento de caminho pela atmosfera (Reno et al., 2012). A AM está relacionada com o ângulo zenital:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (2.5)$$

Quando os raios solares incidem na direção perpendicular à superfície terrestre (~12 horas), na latitude igual à declinação, a AM tem o valor igual a 1 (AM=1, AM1). A massa de ar dois (AM2) ocorre quando o ângulo zénite é de 60 graus, tendo o dobro do comprimento do caminho em AM1. Um fator relacionado com a AM é a turbidez atmosférica que serve de indicador da capacidade de atenuação dos diferentes comprimentos de onda da radiação solar em relação à variação dos constituintes atmosféricos locais.

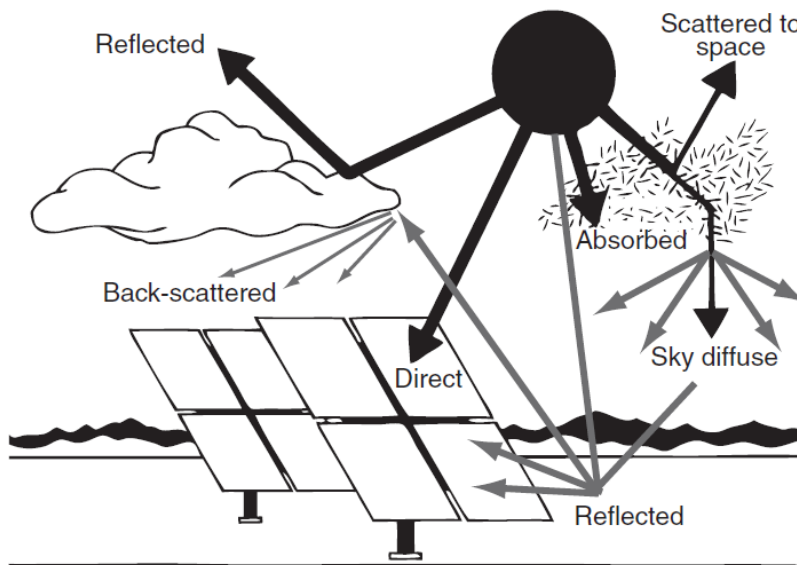


Figura 2: Componentes da radiação solar sobre superfícies de interceção. Fonte: Badescu, 2008.

O fator de turbidez de Linke (TL), para AM2 é uma aproximação muito conveniente para modelar a absorção atmosférica e a dispersão da radiação em condições de céu limpo. Este considera a dispersão e absorção tanto pelo aerossol atmosférico como por vapor de água.

Valores climatológicos de TL são usados como entrada para cálculos de radiação direta, difusa e global em céu limpo (Page, 1986). O TL indica a transparência da atmosfera sem nuvens. Por exemplo, se o céu estiver limpo e seco, o TL será igual a 1. Em cidades poluídas, o TL será entre 7-6. Um valor típico de TL para a Europa é 3. No entanto, este valor apresenta flutuações no espaço e no tempo (<http://www.helioclim.org/linke/>, 2013).

Remund et al. (2003) descrevem os algoritmos e dados usados para construir mapas de TL para todo o mundo, que estão disponíveis no site HelioClim (HelioClim, 2011) ou em Solar Radiation Data (SoDa)(SoDa, 2011). Estes dados têm uma elevada precisão, excepto em locais onde são feitas observações específicas, que são relativamente raros. Para além disso, existe o projeto MACC (*Monitoring Atmospheric Composition and Climate*) no ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) que trabalha e melhora os sistemas de simulação de análise de dados para uma variedade de constituintes atmosféricos importantes para o clima, qualidade do ar e radiação solar em superfície, possibilitando registos de dados sobre a composição atmosférica dos últimos anos, dados de condições atuais e previsão sobre a distribuição de constituintes fundamentais para alguns dias (http://www.ecmwf.int/research/EU_projects/, 2013).

2.1.1 Transferência radiativa

A transferência radiativa consiste na propagação de fótons através de um meio e que transportam energia radiante. A equação geral da transferência radiativa considera todas as fontes e sumidouros da radiação num dado meio e local. Em Chandrasekhar (1960) pode-se seguir a derivação da equação básica, a equação de transferência, determina o campo de radiação num meio que absorve, emite e dispersa radiação. Mayer (2009) relata a importância de uma compreensão detalhada da transferência radiativa atmosférica, referindo que a interação da radiação com as nuvens é o processo mais complexo e para muitas aplicações o mais relevante. A complexidade tem origem na rápida variabilidade espacial e temporal das nuvens, enquanto os aerossóis e gases atmosféricos, geralmente, variam suavemente nas direções horizontais e com o tempo, excepto, quando próximos de fontes (exemplo: cidades). Sendo assim a transferência radiativa de ondas curtas é muito mais complicada em céu nublado. Fung and Ramaswamy (1999), mostram que o vapor de água atmosférico juntamente com as características microfísicas das gotas de água, desempenham um papel importante na reflexão e absorção de céu nublado. Estes referem, ainda, que a imprecisão nos detalhes sobre a localização vertical, extensão e aspetos microfísicos das nuvens pode levar a diferenças na dedução da irradiância em superfície usando medições no topo da atmosfera.

Na NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) a transferência radiativa é uma área de pesquisa, onde é referido que o objetivo dos estudos de transporte de radiação solar é acompanhar o destino da energia radiante que entra no topo da atmosfera (<http://atmospheres.gsfc.nasa.gov>, 2013). Mueller et al., (2004) descreve a utilização integrada de um RTM dentro do novo SOLIS (Esquema Solar Irradiância) notando que a utilização integrada da RTM dentro do módulo clear-sky está ligada com uma enorme melhoria para todas as situações

2.2 Modelos de radiação solar de céu limpo

Desde sempre existiu a necessidade da medição da magnitude da radiação solar. Até em países desenvolvidos existe escassez de medidas a longo prazo de dados de radiação solar, em particular que sejam específicos para uma determinada área geográfica.

Estimativas da radiação solar podem ser feitas usando informações meteorológicas, tais como, a cobertura de nuvens, temperatura e vapor de água em um modelo de transferência radiativa. Os satélites geostacionários constituem uma poderosa alternativa para a inexistência de dados, oferecendo uma ampla cobertura e uma resolução adequada da superfície. Cano et al. (1986) referem que os métodos que usam dados de satélites podem ser divididos em duas categorias: abordagem estatística baseada na relação entre dados de satélite e de campo e a abordagem física, usando um modelo de transferência radiativa para formular uma relação entre os dados de satélite e medições. Cano et al. (1986) descrevem um método estatístico na determinação da radiação solar em superfície, usando dados de satélites meteorológicos e um conjunto de dados de campo para determinar os parâmetros do modelo de regressão, que por sua vez irá prever a radiação global. A ideia deste modelo é que a quantidade de cobertura de nuvens sobre uma determinada área determina estatisticamente a radiação global para essa área. O índice de cobertura de nuvens é determinado a partir da construção de um mapa de referência do albedo em céu limpo, atualizado diariamente e comparado com a imagem atual do satélite. Posteriormente, os fatores de transmissão atmosférica são calculados usando dados do piranômetro permitindo a realização de uma regressão linear entre o índice de cobertura de nuvens e o coeficiente de transmissão medido no solo. Por fim, o mapa global radiação é calculado sobre uma grelha utilizando uma técnica de interpolação entre as estações terrestres. Este artigo (Cano et al., 1986) introduz a versão original do método Heliosat, apesar de haver uma variedade de publicações que utiliza este como base.

O método converte imagens adquiridas por satélites meteorológicos geostacionários, como o Meteosat, GOES ou GMS em dados e mapas de radiação solar recebida em superfície (<http://www.helioclim.org/heliosat/>, 2013). O método Heliosat é utilizado no modelo de céu limpo proposto para a elaboração do Atlas Europeu de Radiação Solar (ESRA) que estima a radiação solar em superfície a partir de imagens de satélite (Rigollier et al., 2000). Os autores investigam o modelo ESRA efetuando uma comparação com outros modelos de céu limpo que utilizam o método Heliosat anterior, uma comparação com outros modelos e uma variação deste na alteração dos parâmetros: elevação do sol e fator de turbidez de linke. Na comparação com outros modelos Dumortier (1995) e MODTRAN (Kneizys et al., 1996), os resultados obtidos mostram-se semelhantes. Nenhum dos modelos proporciona sempre o melhor resultado, no entanto ESRA nunca dá os erros piores. Na comparação com outros modelos de céu limpo (Bourges, 1979 e Brichambaut and Vauge, 1982) que utilizam o método Heliosat, o modelo ESRA é mais preciso, devido à integração de valores da turbidez atmosférica, fator de turbidez de linke. Estes formulam duas variantes para a estimativa da radiação solar: irradiância (valores instantâneos de radiação solar) e irradiação (energia acumulada em períodos).

Ambas conduzem a resultados muito semelhantes, porque o cálculo da componente difusa (D_c) é feita através da mesma formulação):

$$D_c = I_0 \varepsilon T_{rd} (TL(AM2)) F_d(\gamma_s, TL(AM2)) \quad (2.6)$$

Onde I_0 é a constante solar com o valor de 1367 W/m^2 , γ_s é um ângulo de altitude solar, igual a zero no nascer e pôr-do-sol, T_{rd} função de transmissão difusa numa elevação do sol igual a 90° , F_d , função angular de difusão e ε é a correção usada para a variação da distância sol – terra. Sendo diferente o cálculo da irradiância horizontal direta em céu limpo e consequentemente resultados diferentes na radiação global horizontal.

A figura 3 mostra as diferenças entre as duas formulações/modelos para a irradiância horizontal direta, para os vários valores de TL em função da elevação solar. Mostram que a irradiância global diminui com o aumento da turbidez e à medida que diminui a elevação solar.

Os autores Rigollier et al. (2004) realizam uma análise a uma variedade de métodos que tem como base o método Heliosat-1 e concluem que é necessária uma modificação deste método para garantir que qualquer implementação conduza a um bom desempenho. Sendo assim, é apresentada uma nova versão do método Heliosat (Heliosat-2). Esta versão baseia-se nos mesmos princípios físicos (construção de um índice de nuvem). Contudo as entradas para o método são radiações calibradas em vez das contagens digitais das saídas dos sensores. A alteração elimina a necessidade de parâmetros definidos empiricamente e de medições de piranômetros¹ para ajustá-los, ou seja, nenhuma medição em superfície é usada para o seu desenvolvimento, ao contrário do método Heliosat-1. O valor de TL é de primordial importância no método Heliosat-2, pois governa a irradiação em céu limpo. Com o lançamento do MSG as possibilidades de monitorização da atmosfera melhoraram consideravelmente. Este oferece uma maior resolução espacial (1 km) e temporal (15 min), como também oferece 11 canais distribuídos entre os comprimentos de onda 0,6 a $13 \mu\text{m}$.

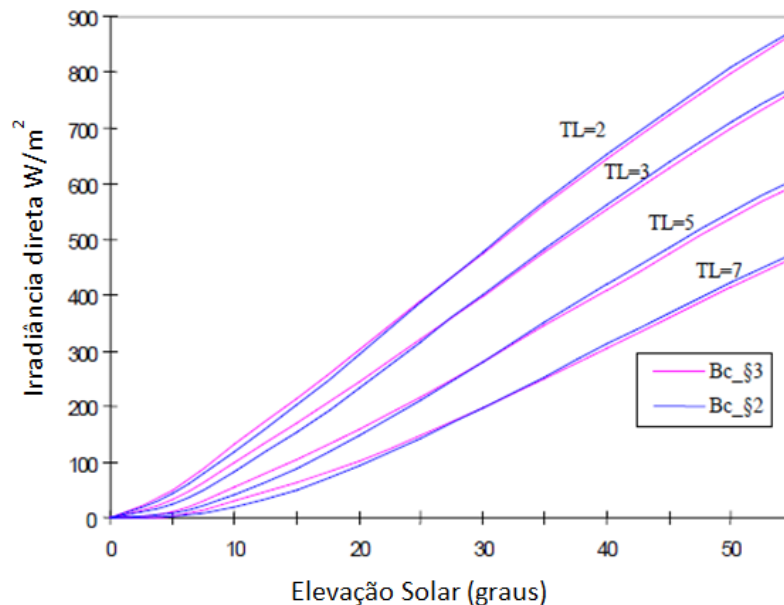


Figura 3: Comparação entre os modelos propostos pelos autores Rigollier et al. (2000): Bc_§2 diz respeito ao modelo que faz uma estimativa instantânea e Bc_§3 ao modelo que estima energia acumulada num período, para o cálculo da irradiância horizontal direta para céu limpo. Fonte: Rigollier et al. 2000.

¹ Sensores de radiação solar, medem a GHI

Tornou-se necessário o desenvolvimento de um novo sistema, que fosse capaz de utilizar as informações adquiridas por este novo satélite, já que o método Heliosat-2 não explora a informação fornecida pelo melhoramento da capacidade dos satélites. O método Heliosat-3 irá fornecer dados de radiação solar de alta qualidade aproveitando os recursos avançados da nova geração de satélites, MSG. No âmbito do projeto Europeu Heliosat-3 é desenvolvido um novo sistema de irradiância solar (SOLIS) (Mueller et al., 2004) que é um modelo físico espectralmente resolvido, com base em cálculos de RTM ao invés de método empírico, utilizando informações dos parâmetros obtidos do satélite MSG (nuvens, ozono, vapor de água) e do GOME/ATSR-2 instrumentos a bordo dos satélites ERS-2 (aerossóis, ozono) como entrada (Mueller et al., 2004), este usa a relação n-k do método Heliosat ou da profundidade ótica da nuvem (COD) para considerar o efeito das nuvens. Sendo assim, a utilização integrada da RTM está ligada com uma enorme melhoria para todas as situações. A integração do RTM é feita através da relação modificada de Lambert-Beer (MLB). A relação de Lambert-Beer é dada por (Mueller et al., 2004):

$$I = I_0 \cdot e^{(-\tau)} \quad (2.7)$$

Segundo estes autores, τ é a espessura ótica, I a radiação direta e I_0 radiação extraterrestre. Considerando a projecção na superfície da terra, equação (2.8):

$$I(\theta_z) = I_0 e^{\left(\frac{-\tau}{\cos\theta_z}\right)} \cos\theta_z \quad (2.8)$$

Na primeira etapa é calculada a profundidade ótica (τ_0) para ângulo zenital igual a zero ($\theta_z=0$) e na segunda etapa, uma correção de τ_0 , levando a relação modificada de Lambert-Beer:

$$I(\theta_z) = I_0 e^{\left(\frac{-\tau_0}{\cos^a(\theta_z)}\right)} \cos\theta_z \quad (2.9)$$

O parâmetro de correção a , é calculado para o ângulo zenital de 60° , AM2. Apenas dois cálculos RTM são necessários para definir a variação diurna completa da irradiância em céu limpo para um determinado estado atmosférico. Este é um modelo simples que pode calcular DNI, GHI e a radiação difusa com base na relação de Lambert-Beer (Stoffel et al., 2010).

Estes são dois dos modelos de céu limpo, usados em modelos operacionais que permitem uma estimativa da radiação solar detalhada para condições ideais (céu limpo) em função de vários parâmetros, por exemplo, da concentração de gases atmosféricos e do ângulo de elevação solar. Mas, também são utilizados para calcular alguns índices, como por exemplo, o índice de claridade (ver equação 2.10).

Em condições de céu limpo, DHI é uma pequena parte de GHI. Quando se tem céu com nuvens, o GHI e DHI são semelhantes. Quando não existem medições de DHI, a estimativa pode ser necessária, para em conjunto com GHI obter-se DNI (ver equação 2.1). Este é um dos motivos que levou ao desenvolvimento de modelos com o objetivo de decompor a radiação global para prever a radiação difusa.

2.2.1 Modelos de decomposição

Os modelos de decomposição da radiação usam informação apenas da radiação global para prever a irradiância direta e difusa, tendo-se em conta diversas variáveis, como por exemplo, a elevação do sol e índice de claridade (Lanini, 2010).

Lanini (2010) divide os modelos em categorias: polinomial, função logística, exponencial e transmissividade. De entre muitos, serão analisados apenas os modelos utilizados/relevantes para este trabalho.

Modelo Polinomial

Um exemplo de um modelo polinomial, é Skartveit and Olseth (1987). Este é baseado no primeiro estudo sobre modelos de decomposição realizado por Liu and Jordan (1960), que introduz as relações empíricas entre o índice de claridade (K_t) e índice de transmitância direta (K_n), equação (2.10) e (2.11), respetivamente:

$$K_t = GHI / \left[TSI \times \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \times \cos \theta_z \right] \quad (2.10)$$

$$K_n = DNI / \left[TSI \times \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

Segundo os autores, r_0 é a distância média entre a Terra e o Sol, com um valor de 149,598 km e r é igualmente a distância Terra – Sol no momento de interesse.

Contudo, Skartveit and Olseth (1987) usam dois preditores, índice de claridade e a altitude solar, no ano 1998, um novo modelo foi desenvolvido, Skartveit and Olseth (1998) (**modelo S&O**) e com este a introdução de um novo parâmetro: índice de variabilidade horária, levando em consideração a presença de nuvens. Este modelo foi desenvolvido e testado para uma superfície sem neve e um albedo de superfície de 0.15.

Modelo função logística

Os modelos desenvolvidos no Hemisfério Norte pareciam ser ineficientes para o Hemisfério Sul. Por esta razão, na Austrália, tornou-se necessária uma abordagem completamente diferente (Lanini, 2010). Boland et al. (2001) desenvolveu um modelo usando uma função logística, que posteriormente foram utilizadas técnicas estatísticas para justificar o uso desta como sendo um modelo. Boland and Ridley (2007) construíram um método para identificar erros, onde os valores atípicos são eliminados, acreditando que este é um passo importante no desenvolvimento de um modelo genérico para estimar a radiação difusa proveniente de GHI e de outros preditores (Boland and Ridley, 2007). Este algoritmo foi aplicado a várias partes do mundo e obteve um resultado satisfatório. Ridley et al. (2010) desenvolveu um modelo universal, designado modelo Boland-Ridley-Lauret (BRL) com múltiplos preditores (índice de claridade, tempo solar aparente, elevação solar, índice de claridade diário e índice de persistência). Em 2012, os mesmos autores propuseram um novo método estatístico e consequentemente um novo **modelo BRL** (Boland et al., 2012). Uma vantagem deste modelo é ser formado por uma única equação, em contraste com a categoria do modelo anterior. No entanto, o tempo de cálculo é longo para dados com um intervalo de tempo reduzido (menos que 1 minuto).

Modelo Exponencial

Ao contrário dos modelos anteriores, Maxwell (1987) desenvolveu um modelo com base em princípios físicos, esse algoritmo foi obtido implementado através de um programa de computador chamado código de simulação de insolação direta (*DISC- Direct Solar Insolation Code model*) (Maxwell, 1987).

Mais tarde Perez et al. (1991) efetuaram correções no modelo DISC que se baseia numa tabela, em que, para cada um de quatro parâmetros (índice de claridade, ângulo zênite solar, coluna de água precipitável e índice de estabilidade) é atribuído um valor de correção (*Look-up tables for Perez model*), **modelo DIRINT**.

Lanini (2010) faz uma comparação entre modelos que determinam a correlação entre a radiação global e a sua fração difusa, referindo que os resultados do estudo são restritos à aplicação local. Os modelos apresentam limitações para elevações solares menores de 30° e parecem ser incapazes de estimar corretamente altas frações difusas. Contudo, o modelo S&O parece ser capaz de reproduzir a radiação difusa para índices de claridade elevados, sendo este de uma forma geral, o melhor. Concluindo-se que índice de claridade e elevação solar são preditores significativos.

Para além de Lanini (2010), muitos outros modelos de decomposição são descritos em Wong and Chow (2001).

Capítulo 3 . Dados e Métodos

3.1 Descrição do modelo

As simulações utilizadas são originárias do modelo WRF-ARW (*Weather Research Forecast*) versão 3.3.1 (Skamarock et al., 2008). É um modelo em desenvolvimento contínuo, numa forma de aperfeiçoar a capacidade de simular corretamente os fenômenos atmosféricos estando disponível gratuitamente para uso da comunidade. É resultado da colaboração entre centros de investigação e agências governamentais dos EUA. Em Skamarock et al. (2008) pode ser encontrada a descrição detalhada da dinâmica e física do modelo, em conjunto com <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>.

Muitos processos físicos não podem ser resolvidos pelas equações dinâmicas do modelo numérico, esses processos são designados processos de “sub-grelha” (escala inferior à resolução do modelo). Estes processos têm de ser parametrizados, devido a natureza microscópica e descontínua, não podendo ser representados pelas leis dinâmicas do fluido na sua forma fundamental (Ferreira, 2007). As parametrizações são uma forma de expressar os processos atmosféricos de “sub- grelha” em função de variáveis de prognóstico que entram nas equações dinâmicas. No caso do WRF, os esquemas de parametrizações estão divididos: *Microphysics* (MP); *Longwave radiation* (LW); *Shortwave radiation* (SW); *Surface layer* (SL); *Land Surface Model* (LSM); *Planetary boundary layer* (PBL); *Cumulus parametrization* (CP). Os esquemas MP (microfísica) solucionam processos de condensação e evaporação; esquemas de radiação LW (radiação térmica) e SW (radiação solar) resolvem as trocas radiativas, esquemas SL (camada superficial) resolvem processos junto à superfície, na camada limite; LSM (solo) resolvem processos no interior do solo; os esquemas PBL (camada limite planetária) determinam os perfis de fluxo dentro da camada limite bem misturada e camada estável e, assim, fornecem tendências atmosféricas de temperatura e humidade (incluindo nuvens), e impulso horizontal em toda a coluna atmosférica; e por fim os esquemas CP (cumulus) resolvem efeitos de nuvens convectivas e/ou superficiais (Skamarock et al., 2008). Para uma melhor simulação dos fenômenos do tempo as parametrizações estão na linha da frente, com isto, o número de esquemas para cada parametrização tem vindo a aumentar. Na simulação da radiação solar, os esquemas de maior importância é o esquema de radiação SW. O esquema de radiação LW (onda longa) inclui radiação infravermelha ou térmica absorvida e emitida por gases e superfícies, já o esquema de radiação SW (onda curta) tem como fonte, o sol, incluindo também a reflexão, absorção e dispersão na atmosfera e em superfícies. Contudo, a radiação que chega a uma determinada superfície é influenciada por outros fatores, nomeadamente, nuvens, aerossóis gases, vapor de água e efeitos geométricos como os sombreamentos. Não são apenas os esquemas de parametrização SW relevantes para esta modelação desta variável mas também outros, como os esquemas CP e MP.

A versão 3.3.1 do WRF coloca à disposição um conjunto de esquemas de parametrizações de SW, CP e MP (http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/):

SW: **Dudhia** (Dudhia, 1989); (old) Goddard; CAM; RRTMG; **Goddard** (Chou and Suarez (1994)) ; FLG (UCLA); GFDL (Eta)

MP: Kessler; Lin (Purdue); WSM3; WSM5; **Eta** (Ferrier) (Parrish and DiMego, 2001); WSM6 (Hong and Lim, 2006); Goddard; Thompson; Milbrandt 2-mom; Morrison 2-mom; SBU-YLin; WDM5; WDM6; NSSL 2-mom; NSSL 2-mom CCN prediction; NSSL 1-mom; NSSL 1-momlfo.

CP: **Kain-Fritsch (KF)** (Kain, 2004); Betts-Miller-Janjic; Grell-Freitas; Old Simplified Arakawa-Schubert; Grell-3; Tiedtke; Zhang-McFarlane; New SAS; New SAS (HWRF); **Grell-Devenyi (GD)** (Grell and Devenyi, 2002); Old Kain-Fritsch.

O sistema de modelação WRF alberga dois cerne dinâmicos distintos: ARW (*Advanced Research WRF*) e NMM (*Nonhydrostatic Mesoscale Model*). O cerne de um modelo numérico consiste na formulação das equações dinâmicas simultaneamente com técnicas para a resolução das mesmas. O domínio de simulação do WRF é o espaço físico representado por uma malha tridimensional no espaço de cálculo. A posição da malha no globo terrestre pode ser definida em longitude e latitude correspondentes ao centro geométrico ou a outro ponto à escolha. Este modelo, permite aninhar (*nesting*) um domínio menor (*nest*) com uma malha mais fina, no interior de um domínio com uma malha mais larga (*parent*), onde que as condições de fronteira do domínio interior são controladas pelo domínio principal. Um domínio pode conter mais do que um subdomínio, desde que estes não se sobreponham. É aconselhável uma razão de 3:1 entre o *parent* e *nest*. Neste trabalho há transmissão de informação do subdomínio para o domínio principal. O modelo é apto para situações atmosféricas idealizadas e reais, no caso de uma aplicação realista, seja na previsão de tempo, ou na simulação de tempo passado, são necessárias condições de fronteiras laterais. As condições de fronteira laterais devem, na medida do possível, representar o estado real da atmosfera vizinha ao longo do tempo da previsão numérica do tempo em escala global. As condições iniciais e de fronteira foram dadas pelas ERA-Interim do ECMWF, com uma resolução horizontal de 0.75° Latitude x 0.75° Longitude e verticalmente de 1000hPa até 1hPa desigualmente espaçados em 38 níveis, em intervalos de 6 horas. A informação da topografia, tanto para a Ilha da Madeira como para a ilha dos Açores utilizou-se SRTM (*Shuttle Radar and Topography Mission*) (Farr et al., 2007) com uma resolução de 3'', para o uso do solo são utilizados dados CORINE (*Coordination of Information on the Environment Land Cover*) (Bossard et al., 2000) para a ilha da Madeira. No caso da ilha dos Açores são utilizados dados padrão do WRF para uso do solo.

O modelo Re.Sun™ (Pereira, 2013) (*Solar Modelling based on Coupling Techniques with Mesoscale Simulations*) tem sido desenvolvido e testado desde 2009 na MEGAJOULE INOVAÇÃO e contando agora com a colaboração do departamento de Física da Universidade de Aveiro para validação e otimização das parametrizações do modelo WRF. O Re.Sun™ corrige os resultados das simulações do modelo WRF, usando técnicas de decomposição da radiação e métodos de interpolação, por recurso a distâncias efetivas, para transporte das quantidades de correção para os pontos da malha de cálculo do Re.Sun™. Os efeitos do terreno estão programados para serem contabilizados através do método proposto por Dozier et al. (1980). O código foi executado segundo os modelos propostos por Rigollier et al. (2000) (ESRA) e Mueller et al., (2004) (SOLIS). O modelo ESRA permite duas formulações empíricas para a estimativa da radiação solar em condições de céu limpo:

Irradiância (W/m^2), adequada para valores instantâneos (3.1):

$$G_c = B_c + D_c \quad (3.1)$$

Onde, neste modelo, G_c é a irradiância global horizontal para céu limpo, B_c a componente direta e D_c a componente difusa. A irradiância integrada analiticamente durante um período de tempo, irradiação ($Wh/m^2.dia$) (3.2):

$$G_c(w_1, w_2) = B_c(w_1, w_2) + D_c(w_1, w_2) \quad (3.2)$$

Onde,

$$w_1 = (t_1 - 12)\pi/12 \quad w_2 = (t_2 - 12)\pi/12 \quad (3.3)$$

O ângulo solar horário, ω , expressa a hora do dia em termos do ângulo de rotação da Terra em torno do seu próprio eixo a partir da sua posição ao meio-dia solar de um lugar específico.

A Terra gira 360° (ou 2π rad) em 24 horas e em 1 hora a rotação é de 15° (ou $\pi/12$ rad). Os dois instantes de tempo, t_1 e t_2 são expressos em horas decimais. A irradiância difusa tem a mesma formulação em ambos os cálculos, então as diferenças entre são ambas pequenas, não excedendo 18 W/m^2 . O modelo SOLIS simplificado (Ineichen, 2008) calcula a irradiância em céu limpo com base em cálculos de transferência radiativa e na relação de Lambert – Beer (equação 2.7).

Re.Sun™ possibilita (figura 4):

- Informação atualizada sobre aerossóis e gases atmosféricos com frequência diária. A fonte de dados TL2 é disponibilizada no endereço soda-is.com (SODA) (Redmund et al., 2003), estes são valores mensais que são interpolados linearmente para valores diários. No caso do modelo de ESRA as equações fazem uso de LT2, o modelo Solis usa como entrada a informação da profundidade ótica do aerossol para um comprimento de onda de 700nm (AOD700). Foi construída uma base de dados de parâmetros climáticos com recurso aos dados da MACC, mas esta não foi utilizada apesar de proporcionar uma melhoria de resultados.

- Correção de pressão e efeitos orográficos de horizonte. Dessas corridas, fatores de correção são estimados e interpolados para os pontos de interesse para corrigir as simulações locais de Clear Sky. Os fatores de correção podem ser calculados em termos do índice Solar Global (Radiação Global WRF/ Radiação Global Clear Sky) ou índices solar direto e difuso, utilizando, neste caso, através de um modelo de decomposição. O modelo tem como configurações físicas:

- O número de pontos utilizado para a interpolação do ponto de interesse (4 ou 16)
- A formulação de céu limpo utilizada (ESRA irradiância, ESRA irradiação e SOLIS simplificado)
- Interpolação ou não de valores de TL ou AOD para a grelha do WRF
- Transporte de radiação: Fração solar global (KG) ou frações solares direta e difusa (kbcs e kdcs)
- Modelo de decomposição: Liu and Jordan model (Liu and Jordan 1960); Orgill and Hollands model (Orgill et al., 1977); Erbs et al. model (Erbs et al., 1982) ; Reindl-1 et al. Model; Reindl-2 et al. model (Reindl et al., 1990); Lam and Li model (Lam et al., 1996); Skartveit and Olseth model (Skartveit et al., 1987); Skartveit and Olseth model (Skartveit et al., 1998); Maxwell model (Maxwell, 1987); Louche et al. model (Louche et al., 1991); Miguel et al. model (Miguel et al., 2001); Oliveira et al. model (Oliveira et al., 2002); Boland et al. model (Boland et al., 2001); Chandrasekaran and Kumar model; J.A. Ruiz-Arias *, H. Alsamamra, J. Tovar-Pescador, D. Pozo-Vázquez, Hawlader model (Alsamamra et al., 2009); BRL model 2010 (Boland et al., 2012); BRL model 2012; REINDL 1990 (Tair and Relative Humidity) e, por fim, Dirint model - Perez Diffuse model (Based on Look-Up tables) correction of the DISC model of Maxwell 1987 (Perez et al., 1991).

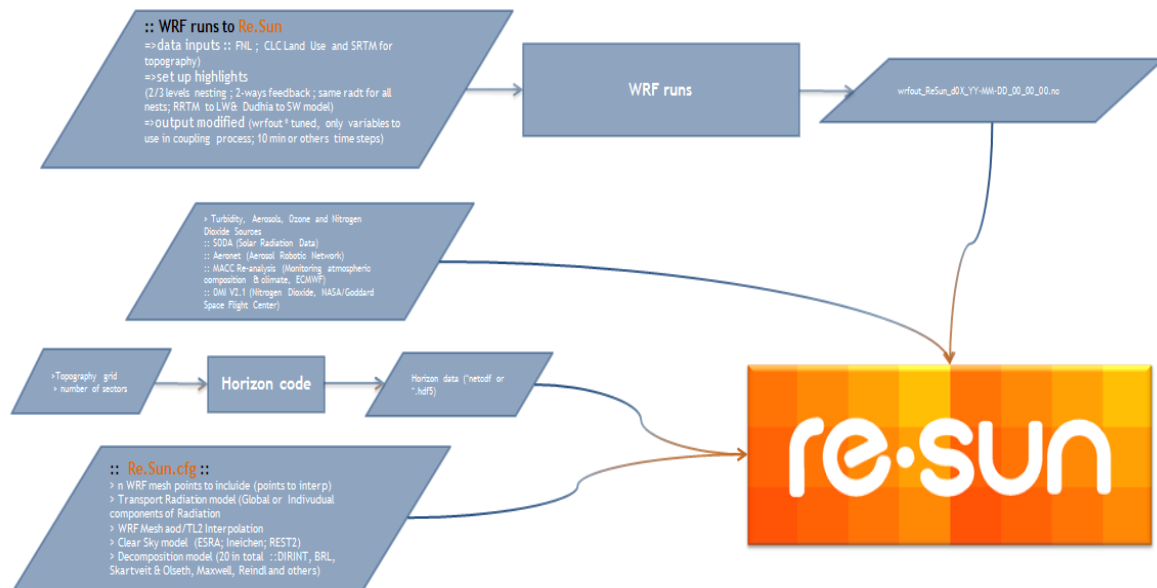


Figura 4: Representação esquemática do acoplamento do modelo numérico WRF e o modelo de radiação solar de céu limpo. Fonte: Pereira, 2013.

3.2 Simulações

As simulações computacionais que serviram de base a este estudo foram realizadas para os Açores (Corvo) e para a Madeira (Funchal), simuladas com 3 domínios, onde 2 são aninhados. A configuração consiste um domínio pai (D01) com uma resolução horizontal de 15 km, um domínio filho (D02) com uma resolução horizontal de 5 km e por fim um terceiro domínio (D03), com uma resolução de 1 km, aninhado no domínio D02. Na figura 5 são mostrados os domínios para o arquipélago dos Açores (a) e Madeira (b).

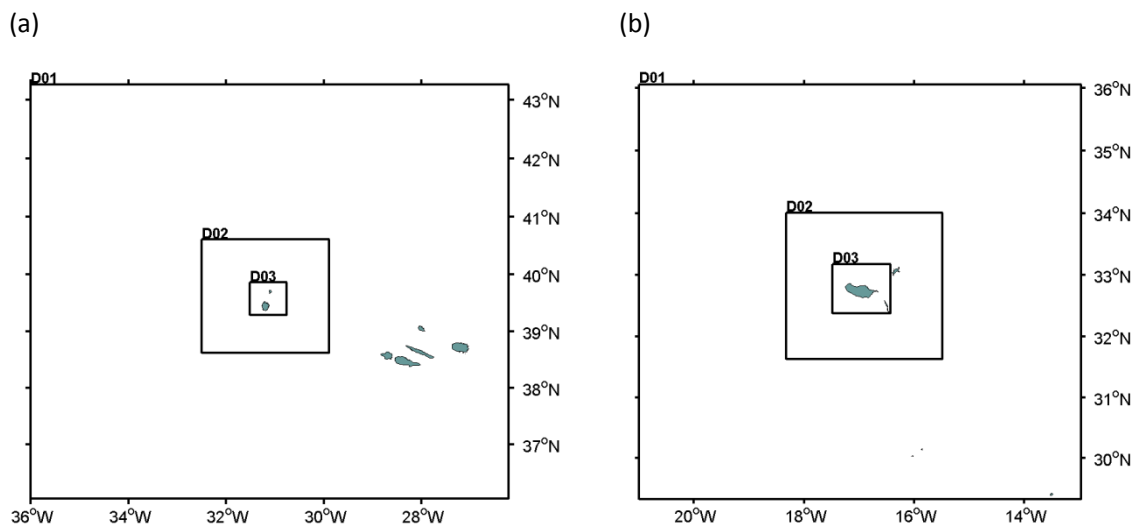


Figura 5: Os três domínios aninhados usados no modelo WRF para a (a) ilha dos Açores e (b) a ilha do Funchal. Representação realizada em Matlab, utilizando scripts disponíveis em M_Map: A Mapping package for Matlab

3.2.1 Açores

As simulações para a ilha do Corvo (Açores) foram realizadas para 3 períodos (meses) independentes: Outubro de 2011, Março 2012 e Julho 2012. Os esquemas das parametrizações utilizadas são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Conjunto de esquemas de parametrizações utilizados nas simulações para o Corvo (LSM: Noah (Chen and Dudhia, 2001); LW: *Rapid Radiative Transfer Model* (RRTM) (Mlawer et al., 1997); SL: MM5 Monin-Obukhov scheme (M&O); PBL: YSU (Yonsei University) (Hong et al., 2006))

	MP	LW	SW	SL	LSM	PBL	CP
DEK	Eta	RRTM	Dudhia	M&O	Noah	YSU	KF

3.2.2 Madeira

No caso da ilha do Funchal (Madeira), efetuaram-se dois tipos de simulações:

- **Parte 1:**

Simulações de período reduzido (2 dias) para 4 meses diferentes, para várias combinações de esquemas de parametrizações. Os períodos foram: 17 e 18 de Janeiro, 24 e 25 de Março, 18 e 19 de Julho e por fim 7 e 8 de Outubro, do ano de 2011. Estes períodos foram escolhidos tendo-se em conta as séries temporais da radiação global horizontal medida nas estações localizadas nesta ilha. Pretendendo-se dias de céu limpo ou quase limpo em ambas as estações.

Tabela 2: Conjunto de esquemas de parametrizações utilizado na realização das simulações para o Funchal, para as simulações com o período de 2 dias

	MP	LW	SW	SL	LSM	PBL	CP
DEK	Eta	RRTM	Dudhia	M&O	Noah	YSU	KF
DWK	WSM6	RRTM	Dudhia	M&O	Noah	YSU	KF
DWG	WSM6	RRTM	Dudhia	M&O	Noah	YSU	GD
GWG	WSM6	RRTM	Goddard	M&O	Noah	YSU	GD

- **Parte 2:**

Simulações mensais (Janeiro, Março, Julho e Outubro de 2011), apenas para dois conjuntos de parametrizações (ver tabela 3).

Tabela 3: Conjunto de esquemas de parametrizações utilizado na realização das simulações para a Madeira, nas simulações mensais

	MP	LW	SW	SL	LSM	PBL	CP
DEK	Eta	RRTM	Dudhia	M&O	Noah	YSU	KF
GWG	WSM6	RRTM	Goddard	M&O	Noah	YSU	GD

3.2.3 Variáveis de saída

As variáveis simuladas para ambas as ilhas foram: Razão de mistura aos dois metros, em kg/kg (Q2); Temperatura do ar aos dois metros (T2), em K; Pressão atmosférica à superfície (PSFC), em Pa; Componente Oeste-Este do vento a 10 metros (U10), unidades m/s; Componente Sul-Norte do vento a 10 metros (V10), igualmente em m/s; Altura do terreno (HGT), em metros; Precipitação total acumulada de origem convectiva (RAIN), em mm; Precipitação total acumulada de origem não convectiva (RAINNC), em mm e radiação global à superfície (SWDOWN), em W/m².

Os ficheiros de saída que irão alimentar o processo têm a designação de *wrfout_HRSC_d<dominio>_<data>.nc* e são salvos diariamente com escrita a instantes de 10 minutos.

3.3 Configurações físicas e numéricas

O código Re.SunTM foi executado para os pontos de interesse (3 estações), utilizando 16 pontos das malhas WRF para interpolação e decomposição, para os pontos de interesse e usando a formulação da irradiação do modelo ESRA e SOLIS simplificado. Apesar de terem sido realizados testes com os vários tipos de modelos de decomposição, apenas se efetuou uma análise mais detalhada para 3 modelos de decomposição diferentes: Skartveit and Olseth model, 1998 (**S&O**); **BRL** model (Ridley B., Boland J., Lauret P.), 2012 e Dirint model - Perez Diffuse model (Based on Look-Up tables) correction of the DISC model of Maxwell 1987) (**DIRINT**). Manteve-se o valor do albedo em 0.2 e a interpolação mensal de valores de TL2 para inter-diários. Os principais outputs, da realização de cada “corrida”, para o ponto: Radiação Global Horizontal, em W/m², radiação direta no plano horizontal radiação difusa no plano horizontal, índice de claridade (adimensional) e elevação solar em graus.

3.4 Observações

Os valores observados e utilizados para validar/comparar são obtidos de três estações, localizadas em duas ilhas Corvo (Açores) e Funchal (Madeira) (ver figura 6):

Tabela 4: Localização das estações de medição da radiação solar global.

	Latitude (° N)	Longitude (° W)
Corvo (Açores)	39,685	31,111
LREC (Madeira)	32,648	16,937
Bica da Cana (Madeira)	32,752	17,052

Corvo:

A estação encontra-se junto ao aeroporto da ilha da Corvo e regista os valores da radiação global na unidade de W/m², a um tempo de integração de 10 minutos. Estes dados foram facultados pela empresa MegaJoule Inovação num ficheiro Excel, contendo os períodos necessários para o estudo: Outubro de 2011, Março de 2012 e Julho de 2012. O local da estação possui uma altitude de 390 m.

LREC (Laboratório regional de Engenharia Civil):

A estação localiza-se na cidade do Funchal (ilha da Madeira) em pleno recinto do laboratório, registando a magnitude da radiação global em W/m². Os registos dizem respeito ao ano de 2011 e foram fornecidos num ficheiro Excel com uma cadência temporal horária. Os períodos em estudo dizem respeito aos meses de Janeiro, Março, Julho e Outubro. O local da estação possui uma altitude de 260 m e encontra-se numa zona urbana.

Bica da Cana:

A estação localiza-se no planalto do Paúl da Serra, Madeira, e é operada pelo LREC. Os registos encontram-se nas mesmas condições e formato que os da estação do LREC. Contrariamente à estação anterior, esta estação localiza-se numa zona não urbanizada, a uma altitude de 1622 m.

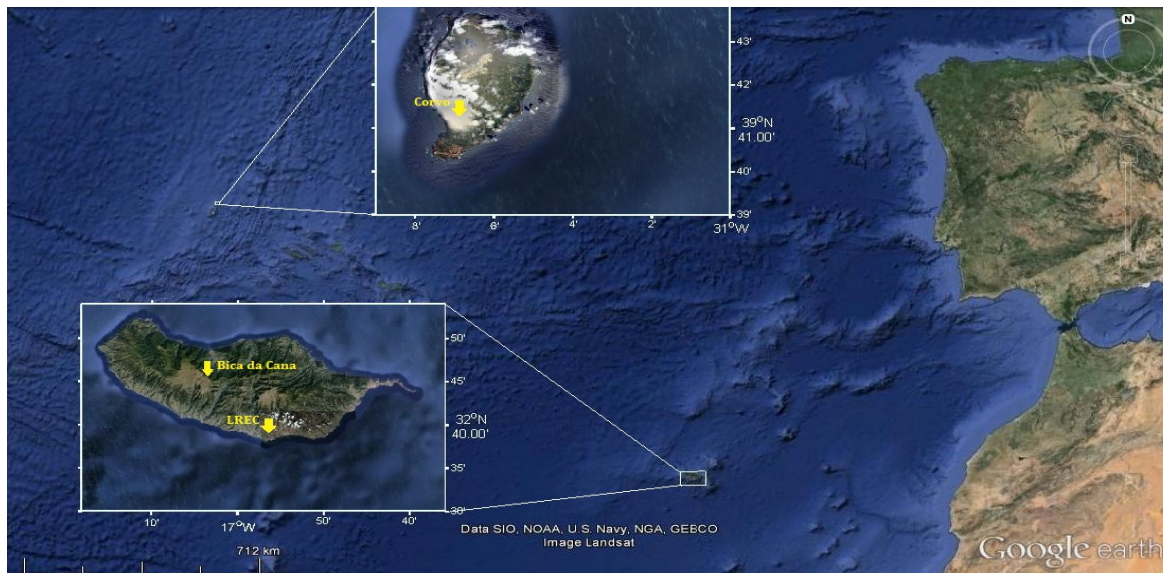


Figura 6: Locais em estudo, arquipélago dos Açores e da Madeira, fonte: Google Earth.

A figura 7 mostra a o diagrama de Hovmöller da radiação global, em W^2/m medida nas estações. Na estação localizada no Corvo (figura 7 (a)) observa-se uma maior percentagem de quantidade de nuvens, principalmente para o mês de Outubro. No mês de Julho verifica-se uma maior magnitude de radiação global. A estação do LREC (figura 7 (b)), o mês de Julho exibe os melhores índices de radiação global. Podendo-se observar uma diferença entre o número de horas diárias de radiação global medida. O mês de Julho exibe mais horas de radiação, medições entre as 8h até as 20h, aproximadamente e o mês de Janeiro é o que apresenta menos horas de radiação, das 10h até às 18h. A maior percentagem de dias de céu ocorre no início do mês de Outubro. Contudo não é neste mês que se verifica a radiação global máxima atingida, no local. Contrariamente à estação do LREC, a estação Bica da Cana (figura 7 (c)), apresenta diferenças entre os meses em estudo. Em Julho, verifica-se um maior número de dias consecutivos de céu limpo e a radiação máxima atingida no local. A diferença entre as estações localizadas na Madeira é devida ao facto de uma estar localizada numa zona de tecido urbano e de altitude inferior, LREC, e outra numa zona alta e montanhosa, a mais de 1600 m de altitude. No ambiente urbano, os aerossóis desempenham um papel importante na atenuação da radiação, e os efeitos de sombreamento de edifícios vizinhos são cruciais.

A estação de Bica da Cana encontra-se numa zona montanhosa a elevada altitude, não sendo por isso influenciada por elementos como edifícios, como acontece com a estação do LREC, e além disso temos o fator altitude, que contribui para uma maior magnitude da radiação observada e maior pureza do ar, logo menor turbidez que se traduz em maior disponibilidade da componente direta da radiação no total da global. Pode concluir-se que na estação da Bica da Cana os períodos de menor radiação deve-se exclusivamente formações nublosas. Comparando-se magnitude da radiação observada nas estações entre ilhas, a do Corvo, possui períodos com menor radiação.

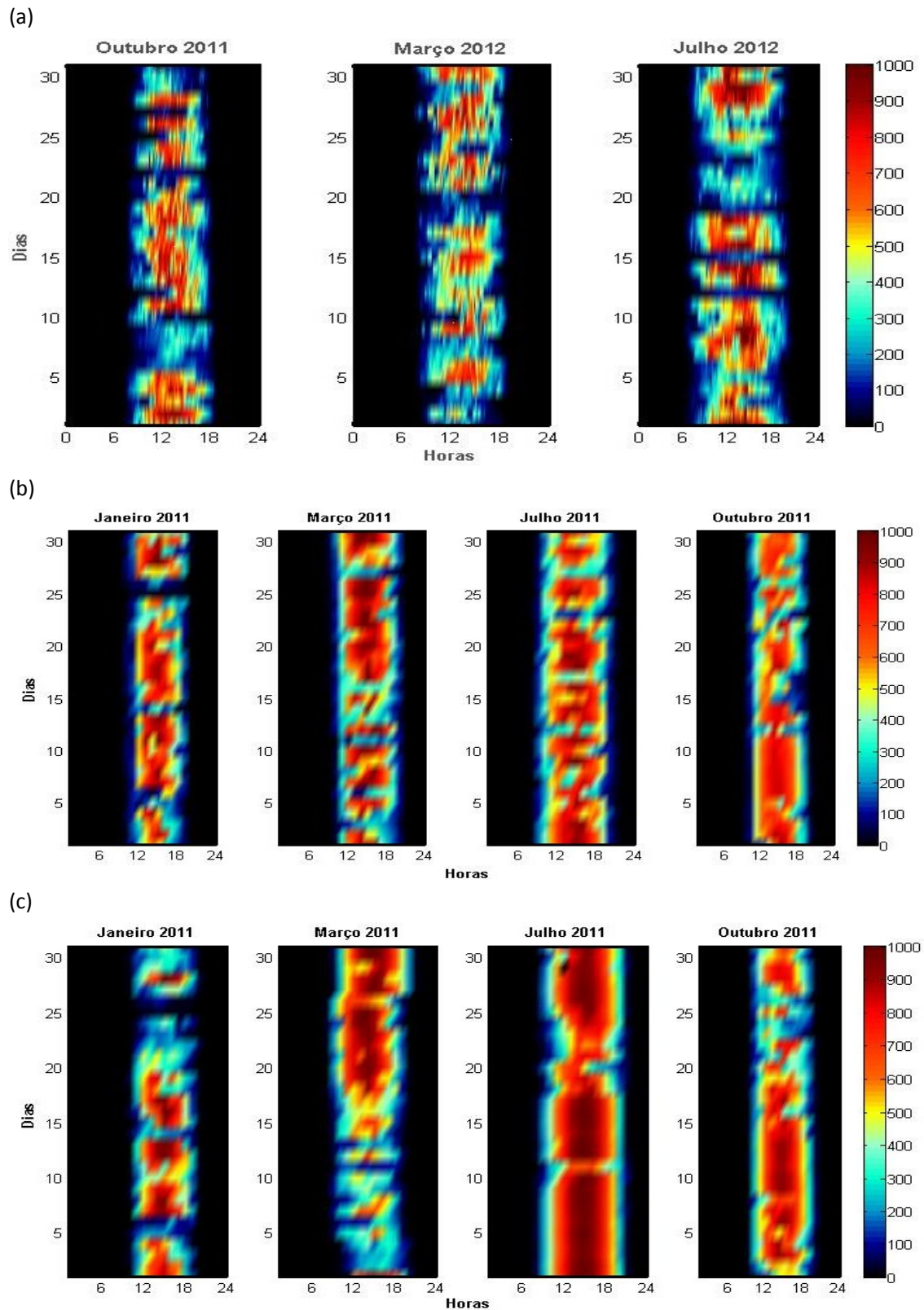


Figura 7: Diagrama de Hovmöller da radiação global (W/m^2) medida, para as estações (a) Corvo, (b) LREC e (c) Bica da Cana, respectivamente. Para os meses de Outubro 2011, Março 2012 e Julho 2012 para o Corvo (a). Para a ilha da Madeira, LREC (b) e Bica da Cana (c), os meses apresentados são: Janeiro 2011, Março 2011, Julho 2011 e Outubro de 2011

3.5 Métodos

A metodologia utilizada tem como objetivo, avaliar o desempenho do modelo nos vários testes efetuados. A qualidade dos dados simulados é definida por várias medidas estatísticas calculadas. A variável avaliada é a radiação global (W^2/m) para os pontos referidos anteriormente, onde só a radiação é medida. A primeira condição é a exclusão de dados do período noturno (radiação global > 0). Outra condição é devida ao facto de que os instrumentos para a medição da radiação solar, para baixas elevações solares tem algumas limitações e por este motivo definiu-se um limite para a elevação solar ϕ (Lanini, 2010):

$$\phi > 5^\circ \quad (3.4)$$

e considerando um valor de índice de claridade (Perez et al., 1992):

$$Kt \geq 0.82 \quad (3.5)$$

3.5.1 Medidas de erros

As medidas de erros calculadas foram (Beyer et al., 2009):

- Diferença entre as médias (viés)

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_e(i) - x_m(i) = \overline{x_e(i)} - \overline{x_m(i)} \quad (3.6)$$

Sendo n, o número total de dados, $x_e(i)$ dados modelados e $x_m(i)$ dados medidos.

- Erro quadrático médio, RMS

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_e(i) - x_m(i))^2} \quad (3.7)$$

- O MB relativo à média é dado por

$$rMB = \frac{MB}{\overline{x_m}} \quad (3.8)$$

- O RMS relativo à média é dado por

$$rRMS = \frac{RMS}{\overline{x_m}} \quad (3.9)$$

- Desvio Padrão do erro, STD

$$STD = \sqrt{RMS^2 - MB^2} \quad (3.10)$$

$$rSTD = \frac{STD}{\overline{x_m}} \quad (3.11)$$

- Coeficiente de correlação, R

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_e(i) - \overline{x_e}) \cdot (x_m(i) - \overline{x_m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_e(i) - \overline{x_e})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_m(i) - \overline{x_m})^2}} \quad (3.12)$$

As medidas representadas no Diagrama de Taylor (K. Taylor 2001), foram calculadas a partir de uma função de Matlab, *allstats*, criada por Guillaume Maze (2008), disponível em <http://codes.guillaumemaze.org/>.

Esta função utiliza:

- Erro quadrático médio centrado dado por

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((x_e(i) - \overline{x_e(i)}) - x_m(i) - \overline{x_m(i)})^2} \quad (3.13)$$

- Desvio padrão para os dados simulados é definido como

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_e(i) - \overline{x_e(i)})^2} \quad (3.14)$$

e para os dados observados

$$S_{obs} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_m(i) - \overline{x_m(i)})^2} \quad (3.15)$$

O coeficiente de correlação é calculado pela equação (3.12).

Considera-se que a qualidade dos valores simulados pelo modelo é elevada, quando se verifica os seguintes critérios (Luna et al., 2011):

$$S \approx S_{obs}$$

$$RMS < S_{obs}$$

$$RMSD < S_{obs}$$

$$STD^2 \sim RMS^2 \leftrightarrow MB^2 \ll RMS^2$$

3.5.2 Teste Kolmogorov-Smirnov

O teste Kolmogorov-Smirnov (teste K-S) (Massey, 1951) é usado para determinar se as distribuições dos dados observados e modelados diferem significativamente. O teste K-S testa a hipótese nula: dois conjuntos de dados pertencerem à mesma distribuição, sendo rejeitada se a discrepância, D_s , for suficiente elevada. O teste K-S é definido pela equação:

$$D_s = \max(|F1(x_1) - F2(x_2)|) \quad (3.16)$$

Em que $F1$ e $F2$ são funções de distribuição cumulativa das variáveis x_1 e x_2 . O nível de significância utilizado foi de 5%. Para o h igual a 1, o teste rejeita a hipótese nula para um nível de significância de 5% e zero o contrário. O valor-p, é a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema que aquela observada numa amostra, sob a hipótese nula, retornando um valor escalar no intervalo $[0,1]$. Foi utilizada a função *kstest2* disponível em Matlab.

3.5.3 Funções de Probabilidade

A função probabilidade associa cada valor possível da variável aleatória (X) à sua probabilidade de ocorrência $P(X)$ e para o seu cálculo foi aplicada a função do matlab, *ksdensity*, que devolve uma estimativa da densidade de probabilidade. O cálculo baseia-se na função de *Kernel* (Bowman and Azzalini, 1997). A função de probabilidade acumulada mostra a soma acumulada de probabilidades, adicionando o valor de X do menor para o maior, tendendo para 1. Foi igualmente, utilizada uma função de Matlab, *ECDF* (Cox and Oakes 1984), para o cálculo da função de distribuição cumulativa empírica.

Capítulo 4 . Resultados

4.1 Modelos decomposição

Os resultados obtidos, em parte, são uma consequência do modelo de decomposição utilizado. Nesta secção pretende-se estudar a influência de diferentes modelos de decomposição (baseadas em diferentes variáveis), na estimativa da radiação global, para a estação localizada na ilha do Corvo. Na tabela 5 são mostrados valores médios observados e modelados para o domínio D03, nos 3 meses em estudo, para os modelos em análise com o conjunto de esquemas de parametrização descritos na tabela 1. Os modelos apresentam valores semelhantes entre si, sendo mais evidente a semelhança entre os modelos S&O e BRL, para o mês de Outubro e Março. No mês de Outubro, DIRINT apresenta uma melhor prestação, já no mês de Março e Julho nenhum dos modelos se destaca, obtendo-se valores idênticos nos 3 modelos. Os valores obtidos para o domínio D02, mostrados na tabela 6, confirmam a mesma tendência. Observa-se uma melhor prestação do modelo DIRINT para o mês de Outubro e Março. No mês de Julho, apesar de não apresentar a melhor prestação, tem um valor muito próximo do melhor resultado. Na figura 8 são mostrados os diagramas de Taylor para a radiação global, para todos os períodos e para os dois domínios menores (D03 e D02), baseado nas condições descritas em 3.5. Estes diagramas mostram o desvio padrão, RMS centrado (retirada a média) e o coeficiente de correlação entre os resultados obtidos pelos modelos e as observações. Observa-se que, para o mesmo mês e domínio, os resultados entre os modelos são idênticos. Todavia, S&O e BRL são os mais semelhantes. Verifica-se um aumento de correlação para o mês de Julho, nomeadamente para o domínio menor. Contudo o menor RMSD é apresentado para o mês de Outubro. Para o mês de Março, verifica-se a correlação menor e um elevado valor de RMSD.

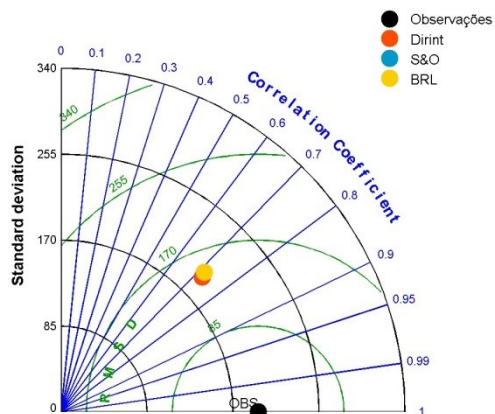
Tabela 5: Valores médios mensais das simulações para o domínio D03 obtida para os 3 modelos de decomposição da radiação e das medições para a estação localizada no Corvo.

Período	Radiação Global Horizontal [W/m ²]			
	Medições	Simulações – D03		
		Dirint	S&O	BRL
Out-11	102,4	97,6	95,6	95,7
Mar-12	123,8	139,8	138,1	138,1
Jul-12	188,5	254,2	254,1	255,3

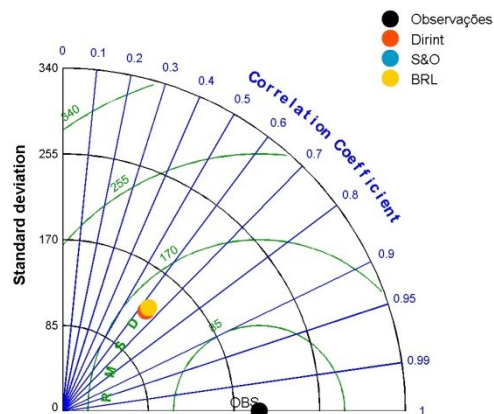
Tabela 6: Valores médios mensais das simulações para o domínio D02 obtida para os 3 modelos de decomposição da radiação e das medições para a estação localizada no Corvo.

Período	Radiação Global Horizontal [W/m ²]			
	Medições	Simulações – D02		
		Dirint	S&O	BRL
Out-11	102,4	70,2	68,1	68,2
Mar-12	123,8	121,0	118,4	118,4
Jul-12	188,5	230,6	230,4	230,9

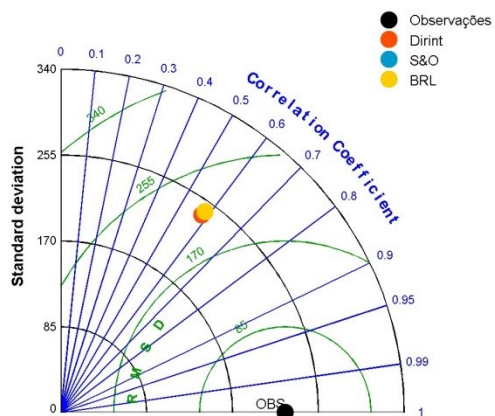
(a)

Outubro 2011 – Domínio D03

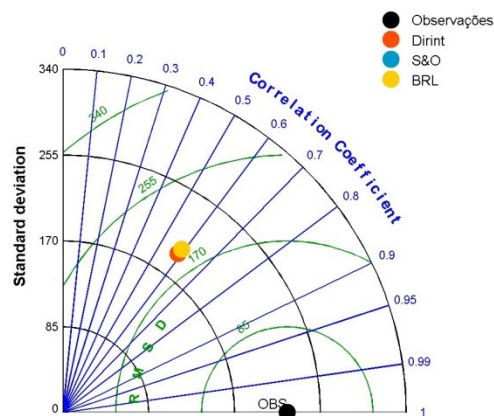
(b)

Outubro 2011 – Domínio D02

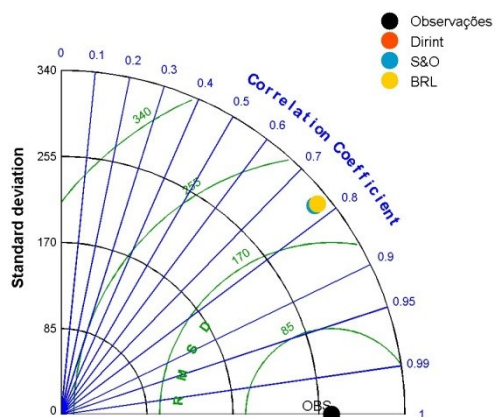
(c)

Março 2012 – Domínio D03

(d)

Março 2012 – Domínio D02

(e)

Julho 2012 – Domínio D03

(f)

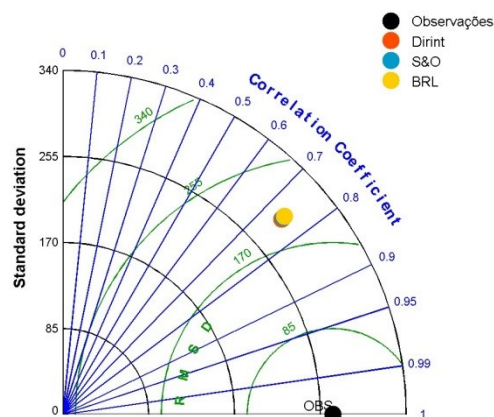
Julho 2012 – Domínio D02

Figura 8: Representação das medidas de erro no diagrama de Taylor, para o domínio D03 (esquerda) e o domínio D02 (direita), Outubro de 2011 (a) e (b), Março de 2012 (c) e (d) e Julho de 2012 (e) e (f) para a estação do Corvo

Verificando-se que os resultados são similares, é apresentada uma análise mais detalhada apenas para um modelo de decomposição, dos 3 em estudo. Para o mês de Outubro, o melhor resultado é originário do modelo DIRINT ($h=0$, os dois conjuntos de dados pertencem à mesma distribuição). Para os restantes meses, apesar de não se obter o melhor resultado para DIRINT, os resultados entre os modelos é semelhante. A análise mais detalhada será feita para o modelo DIRINT. A tabela 7 apresenta as medidas de erro, para o modelo DIRINT, domínio D03 (exclusão de valores nocturnos). Observa-se que para este domínio o mês de Outubro apresenta os melhores resultados. O viés indica uma subestimação por parte do modelo para o mês de Outubro ao contrário dos restantes meses. O mês de Julho apresenta um valor elevado viés e p reduzido, apesar de apresentar o valor mais elevado de coeficiente de correlação para este domínio. Neste domínio, o mês de Março é o que apresenta menor correlação ($R = 0,58$) e elevado valor de RMS e STD. A tabela 8 mostra os resultados das medidas de erro, para o modelo DIRINT à semelhança da tabela 7, mas neste caso para o domínio D02. O mês de Março revela uma melhor prestação. Para os meses de Outubro e Março, existe uma subestimação do modelo, ou seja, este prevê uma radiação menor do que a medida, mais evidente no mês de Outubro. Neste domínio, o mês de Julho apresenta a melhor concordância entre os dados simulados e medidos ($R=0,75$), contudo um elevado desvio, indicando que os dados modelados seguem a tendência dos dados medidos. O mês de Outubro tem a pior prestação (maior viés, menor R). Na comparação entre domínios D03 e D02, verifica-se que uma melhor prestação dos meses de Março (com uma melhoria significativa) e Julho no domínio D02. Contudo, para o mês de Outubro, o domínio D03 apresenta resultados melhores, confirmando-se hipótese nula ($h=0$), o conjunto de dados pertence à mesma distribuição. Em todos os meses e em ambos os domínios, é neste período que não existe rejeição da hipótese nula para um nível de significância de 5%. Sendo assim o conjunto de dados não diferem significativamente. Em suma, o mês de Outubro apresenta melhor prestação para o domínio D03. Os meses, Março e Julho, apresentam melhor prestação para o domínio D02, para a combinação de parametrizações apresentadas na tabela 1.

Tabela 7: Resultados das medidas de erro, com um passo temporal de 10 min, da estação do Corvo, para o modelo de decomposição DIRINT para o domínio D03 e esquema de combinação DEK.

Período	N	MB [Wm ⁻²]	RMS [Wm ⁻²]	STD [Wm ⁻²]	rMB [%]	rRMS [%]	rSTD [%]	R	h	p
Out-11	1837	-11,7	145,1	144,6	-4,7	58,3	58,1	0,72	0	0,07
Mar-12	2036	34,2	214,9	212,2	12,6	79,2	78,2	0,58	1	$2,9 \times 10^{-5}$
Jul-12	2490	117,9	238,3	207,1	34,9	70,5	61,3	0,77	1	$1,5 \times 10^{-36}$

Tabela 8: Resultados das medidas de erro, com um passo temporal de 10 min, da estação do Corvo, para o modelo de decomposição DIRINT para o domínio D02 e esquema de combinação DEK.

Período	N	MB [Wm ⁻²]	RMS [Wm ⁻²]	STD [Wm ⁻²]	rMB [%]	rRMS [%]	rSTD [%]	R	h	p
Out-11	1837	-78,2	169,1	149,9	-31,4	68,0	60,3	0,64	1	$1,3 \times 10^{-37}$
Mar-12	2036	-7,1	191,3	191,2	-2,6	70,5	70,4	0,59	1	$1,1 \times 10^{-3}$
Jul-12	2490	75,6	213,6	199,8	22,4	63,2	59,1	0,75	1	$2,7 \times 10^{-14}$

Foram calculadas as distribuições e função da distribuição cumulativa para todos os modelos, domínios e períodos. Optou-se por mostrar apenas resultados para o mês de Outubro para o domínio D03 e D02, já que se verificou um comportamento similar entre modelos para o mesmo período e este mês. Para além disso, este mês exibe as piores (D02) e melhores (D03) prestações. As figuras 9 (a) e (b) mostram as distribuições da irradiância (W^2/m), para o mês de Outubro, para o domínio D03 e D02, respetivamente. Para o D03, de uma forma geral o modelo apresenta uma boa resposta. Contudo este parece ter mais valores simulados entre aproximadamente 130 e 230 W^2/m . Para o domínio D02, o modelo apresenta uma maior frequência para valores mais baixos de radiação global. Porém, para valores maiores de radiação global (superiores a 400 W^2/m), o modelo apresenta uma menor frequência em relação às medições, ou seja, o modelo não prevê valores elevados de radiação global para este domínio. Para o mês de Julho (não mostrado), verifica-se o inverso, o modelo apresenta uma frequência maior para valores elevados de radiação solar ($> 700 W^2/m$). Essa distribuição é evidente em ambos os domínios. As figuras 9 (c) e (d), mostram a função da distribuição cumulativa, observando-se uma maior diferença entre as distribuições para o domínio D02, enquanto para o domínio D03 (figura 9 (c)) as distribuições são semelhantes, ou seja, o domínio D03 apresenta o valor de p superior ao do domínio D02.

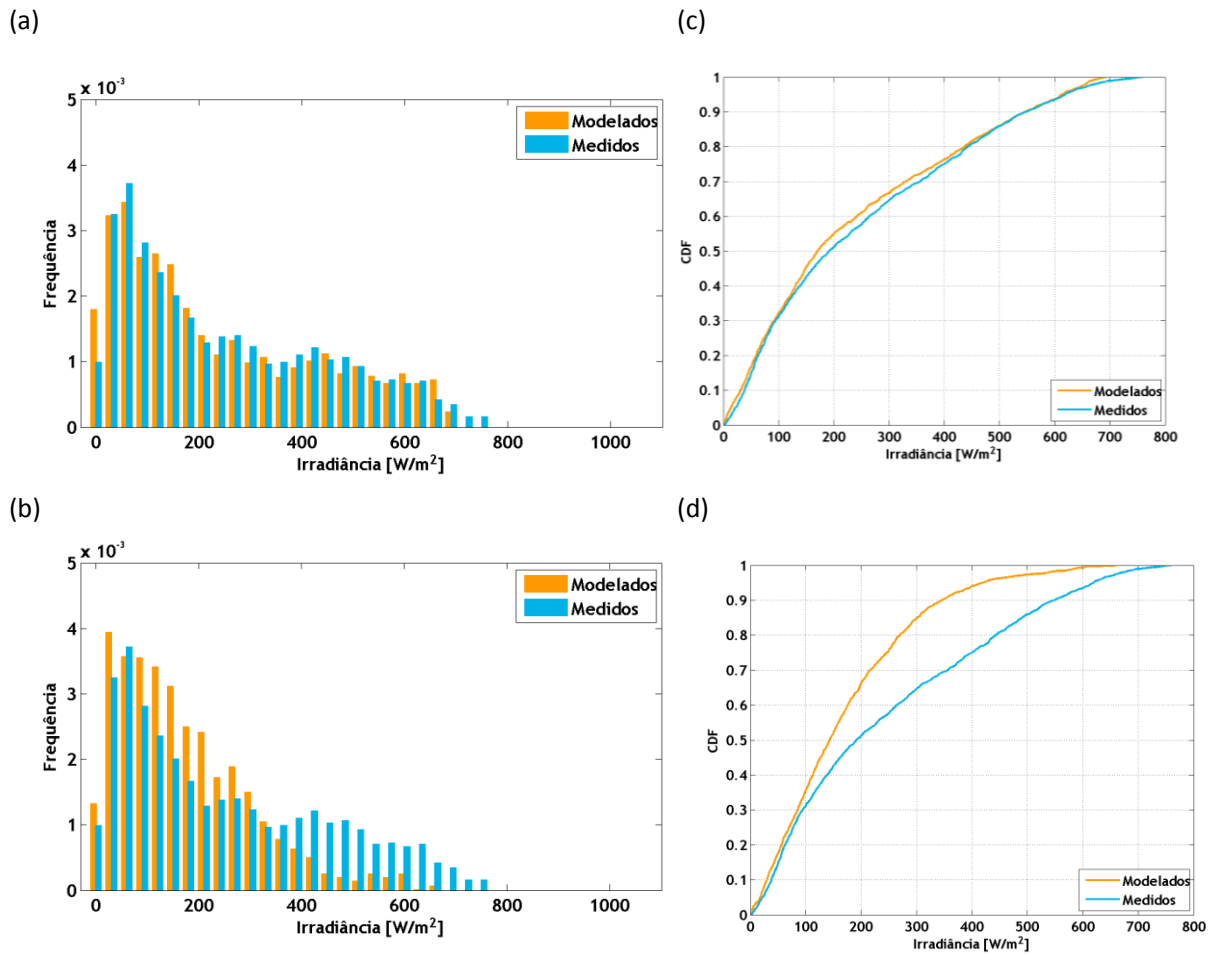
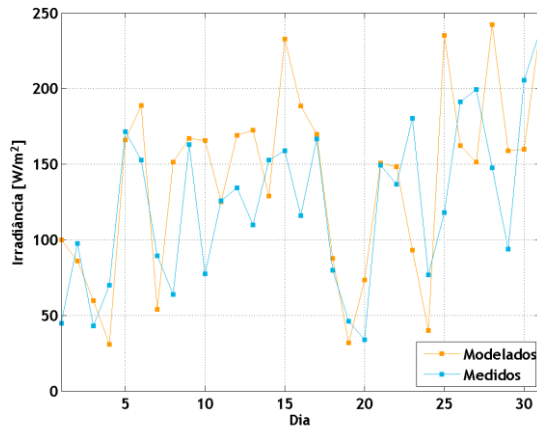


Figura 9: Histogramas (lado esquerdo) e distribuição cumulativa (lado direito) da irradiância (W^2/m), para o mês de Outubro, para o domínio D03 (em cima) e D02 (em baixo). Modelo DIRINT e combinação DEK.

(a)



(b)

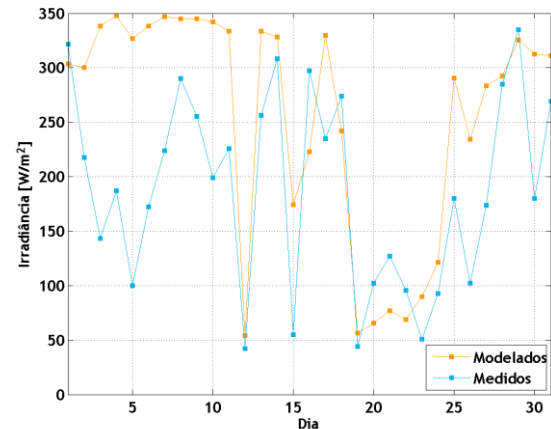


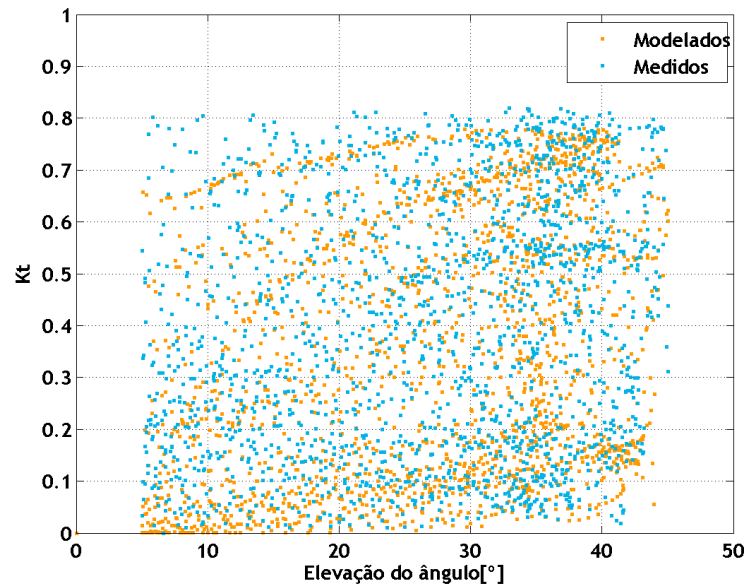
Figura 10: Valores médios diários da irradiância para os valores simulados (laranja) e medidos (azul), para Março (a) e Julho (b), modelo DIRINT para o domínio de menor dimensão (D03).

Para os meses de Março e Julho, as tabelas 7 e 8 mostram que o domínio D02 apresenta uma melhor prestação comparativamente ao domínio D03. O mês de Julho, para ambos os domínios é apresentada uma sobrestimativa do modelo (viés positivo). Na figura 10, está representada a média diária da radiação global para Março (figura 10 (a)) e Julho (figura 10 (b)) no domínio D03, verificando uma diferença mais significativa entre os valores medidos e valores simulados para o mês de Julho, mas de uma forma geral o modelo prevê valores mais altos de radiação global. As convecções de verão são representadas com menos precisão comparativamente a eventos que ocorrem durante as estações frias. Porque, instabilidades dinâmicas em grande escala durante os eventos frios são modeladas com mais precisão que as instabilidade térmica na superfície originárias de eventos de estações quentes. Sendo assim, a previsão de convecção pode variar daquela que realmente ocorre. Observando o diagrama de Hovmöller (figura 7), para esta estação, verifica-se que não existe uma diferença significativa na intensidade de radiação entre os períodos em estudo, esperando-se que o mês de Julho se destaca com a maior disponibilidade e tal não se observa. Este mês é caracterizado pela presença do anticiclone, no entanto verificam-se ocorrência de aguaceiros fracos associados ao desenvolvimento de estratocúmulos, formados durante a noite que se desenvolvem devido a convecção diurna e/ou por efeito orográfico.

Os modelos de decomposição têm como principal finalidade decompor a radiação global em radiação direta e difusa. A radiação difusa é influenciada principalmente pela concentração de gases, aerossóis e vapor de água que atmosfera contém. O índice de claridade K_t (equação 2.10) permite avaliar a quantidade de radiação global que é atenuada. Nas figuras 11 (a) e (b) é apresentado o K_t para o mês de Outubro, para o domínio D03 e D02, respetivamente. No domínio D03, existe diferença de comportamento entre os dados medidos e simulados, nos dados medidos não se verifica a distribuição aleatória verificada pelas medições. Todavia, para elevações maiores são caracterizadas por um resposta semelhante entre os valores medidos e os valores do modelo, sendo que, o modelo apresenta uma concentração de valores aproximadamente aos 35 graus. Para o domínio D02, os

valores modelados estão concentrados numa faixa para valores baixos de K_t , ou seja, o modelo indica que há grande percentagem de radiação que é atenuada. Isto pode ser explicado pela presença de aerossóis na atmosfera ou nebulosidade. Como os dados medidos não tem essa distribuição e analisando a irradiância, verifica-se uma subestimação por parte do modelo.

(a)



(b)

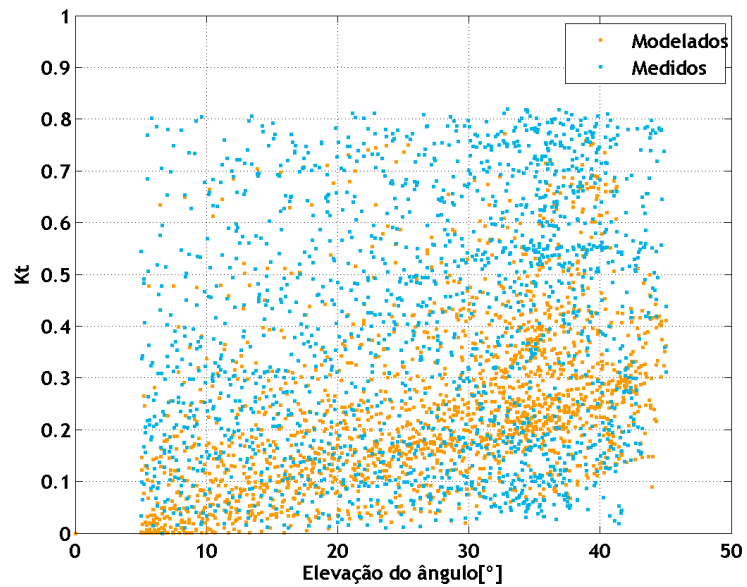


Figura 11: Representação de K_t em função da elevação solar para o mês de Outubro para o domínio D03 (a) e para o domínio D02 (b).

4.2 Esquemas de Parametrização

Os modelos de decomposição são importantes na estimativa da B_c e D_c , mas no caso da estimativa da G_c , os esquemas de parametrização utilizados nas simulações tornam-se ainda mais importantes. Efetuaram-se várias simulações com diferentes combinações de esquemas de parametrizações e as combinações escolhidas forma com bases em trabalhos realizados. São inúmeros os estudos realizados no âmbito dos vários esquemas de parametrizações disponíveis no modelo WRF e a influência destes em determinados eventos e variáveis, sendo dado destaque aos esquemas MP, SW e CP. Gilliland et al. (2007) fazem uma comparação entre três esquemas de CP (Kain-Fritsch, Betts-Miller-Janjic e Grell-Devenyi) disponíveis no modelo WRF para avaliar o impacto das diferenças ao simular uma “convecção de verão”, mantendo os restantes esquemas de parametrizações (referindo que SW: Dudhia e MP: WSM6). Os autores referem que nem sempre é apropriado assumir simulações utilizando pequenos espaçamentos de grelha ($< 5\text{km}$), pois não precisam de um esquema CP. Dependendo do forçamento à escala sinótica e da época do ano, certas configurações atmosféricas garantem o uso de um esquema de parametrização CP para representar os efeitos de processos convectivos de sub-grelha. O mesmo estudo mostrou que para a representação com precisão de processos que ocorrem com células convectivas isoladas, mesmo com um esquema MP complexo o modelo pode não representar a convecção explicitamente. A simulação com o esquema Betts-Miller-Janjic mostrou-se incapaz de reproduzir precipitação, mesmo existindo condições favoráveis. Uma limitação deste esquema é a falta de humidade nas sondagens, sendo limitado na aplicação em determinados ambientes. Já o esquema Grell-Devenyi fracassou no desencadeamento precoce e desenvolvimento de uma ampla área de convecção que não é representativa da real natureza das células convectivas isoladas. O esquema Kain-Fritsch deteta o desenvolvimento da convecção. Ao decidir-se sobre a escolha do esquema CP a ser utilizado é essencial saber que tipo de sistema convectivo é provável desenvolver-se e tipo de ambiente (seco/húmido) (Gilliland et al., 2007). Ferreira (2007), efetuou comparações entre diferentes combinações de esquemas de parametrizações usando o modelo WRF para Portugal Continental, analisando isoladamente a variável SWDOWN. Para avaliar a melhor combinação comparou com dados observados, indicando que todas as parametrizações influenciam o cálculo da radiação à superfície. Para os esquemas SW mostra que nas primeiras horas de previsão o esquema Goddard dá erros inferiores mas a situação reverte-se dando um ligeira vantagem a Dudhia. Para o período Janeiro-Março Dudhia supera Goddard e o esquema CP Kain-Fritsh está em vantagem, sendo que a combinação Kain-Fritsh + Dudhia apresenta uma boa prestação para este período. Mantendo Kain-Fritsh o esquema MP WSM6 combina melhor com Dudhia em comparação com Goddard. No período Outubro- Dezembro, o melhor desempenho vem da combinação Dudhia+WSM6+Grell-Devenyi, que consiste numa boa representação do efeito das nuvens no cálculo das trocas radiativas. Luna et al. (2011) utilizam a seguinte combinação de parametrizações (para MP, SW e CP) no modelo WRF para simulações da Madeira: WSM6, Goddard e Grell-Devenyi, mostrando que a parametrização CP não é revelante para a simulação da precipitação, no caso em estudo. Um teste de sensibilidade, até 23 configurações alternativas no modelo WRF, sobre a Península Ibérica foi realizado por Borge et al. (2008). Estas foram testadas para um domínio com uma resolução espacial de 3 km. Nenhuma parametrização CP é necessária desde que esses fluxos possam ser resolvidos explicitamente em grelhas com resoluções espaciais de aproximadamente 5-10 km (Skamarock et al., 2005). Os

resultados para dois períodos diferentes (Inverno e Verão) ano de 2005, confirmaram que, em geral, a configuração (MP e SW) que fornece melhor desempenho é WSM6 e Dudhia.

Neste trabalho serão analisadas as combinações com os seguintes esquemas de parametrizações:

- Microfísica (MP): WSM6 e Eta
- Radiação de curto comprimento de onda (SW): Dudhia e Goddard
- Cumulus (CP): Kain- Fritsch e Grell-Devenyi

O esquema WRF Single-Moment 6-class (WSM6) inclui todas as formas de precipitação. O esquema Eta Ferrier (Eta) prevê mudanças no vapor de água, condensação em forma de nuvem, chuva, nuvem de gelo e precipitação de gelo (neve/granizo) (Skamarock et al., 2008). Na parametrização de SW utilizaram-se dois esquemas, um esquema simples de integração da radiação descendente do fluxo solar (Dudhia, 1989) e usa tabelas 'look-up' para as nuvens que são definidas por Stephens (1978). A versão 3 do WRF tem como opção a inclusão de efeitos de inclinação e sombreamento de terreno que não foram utilizados. Estes últimos foram incluídos pelo Re.SunTM nas simulações de mais pequena escala analisando as elevações para 96 azimutes em torno de cada ponto.

O outro esquema, Goddard, inclui a camada de ozono, definida pela média climatológica do mês em causa e tem um total de 11 bandas espectrais. Por fim, os esquemas escolhidos de parametrização de nuvens convectivas (CP) foram Kain- Fritsch e Grell-Devenyi. O esquema Kain- Fritsch (KF), utiliza um modelo simples de nuvem com correntes ascendentes e descendentes de ar húmido, inclui o efeito de *detrainment*, arrastamento e microfísica relativamente simples. O Grell and Devenyi (GD) é um método que introduz um regime de cumulus que produz uma média de ensemble com pesos pré-definidos.

4.2.1 Parte 1

Os resultados apresentados serão sempre para o mesmo modelo de decomposição (DIRINT), já que mostrou ser o mais robusto e porque a diferença entre os restantes modelos é insignificativa e desta forma é possível verificar a influência da alteração dos esquemas de parametrizações. Para os resultados obtidos nos testes das diferentes combinações de esquemas, para a ilha da Madeira, em duas estações com características distintas (urbana-LREC e rural/montanha - Bica da Cana), são mostrados apenas os diagramas de Taylor. A figura 12 mostra os diagramas de Taylor, para o período 17 a 18 de Janeiro, para a estação do LREC (esquerda) e a estação da Bica da Cana (direita), para o domínio D03. Não é apresentado o domínio D02, porque os resultados das combinações são semelhantes, para a mesma estação. A combinação GWG apresenta melhor prestação para a estação do LREC. A estação da Bica da Cana existe uma diferença significativa entre a combinação DEK e as restantes combinações. Sendo a DEK aquela que apresenta melhor prestação. As combinações DWG e DWK, nunca apresentam a melhor prestação, observado o diagrama. Contudo, estas apresentam os valores mais reduzidos de viés (não é mostrado). Para este período, como é mostrado no diagrama de Hovmöller (figura 7), na estação da Bica da Cana verificou-se a presença de nuvens. A combinação DEK, dá resultados semelhantes para ambas a estações.

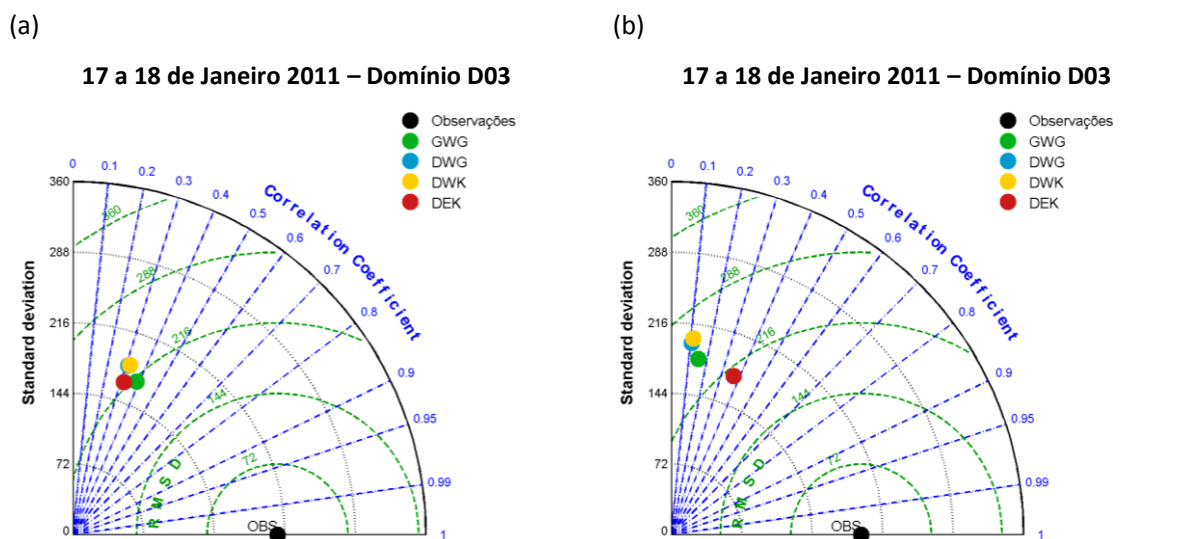
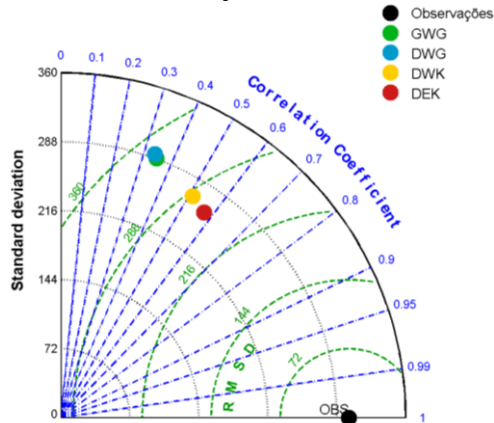


Figura 12: Representação das medidas de erro no diagrama de Taylor, para o domínio D03, no período 17 a 18 de Janeiro 2011, para a estação do LREC (a) e a estação da Bica da Cana (b)

De forma igual, para período de 24 e 25 de Março de 2011, são mostrados os diagramas apenas para o domínio menor (D03), já que os resultados para o domínio D02 são semelhantes (figura 13). Na estação do LREC verifica-se uma diferença significativa entre as combinações, sendo a melhor prestação apresentada pela combinação DEK. O mesmo acontece para a estação da Bica da Cana. Contudo, nesta estação as prestações entre as diferentes combinações é aproximada.

(a)

24 a 25 de Março 2011 – Domínio D03



(b)

24 a 25 de Março 2011 – Domínio D03

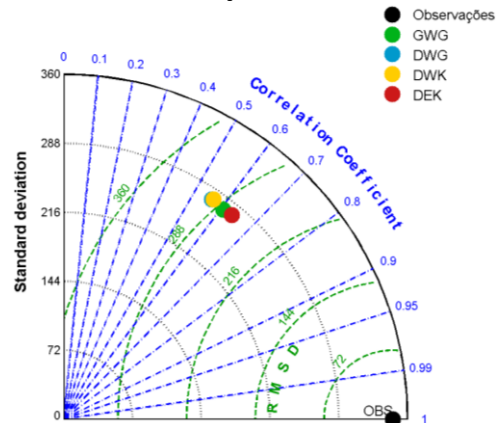
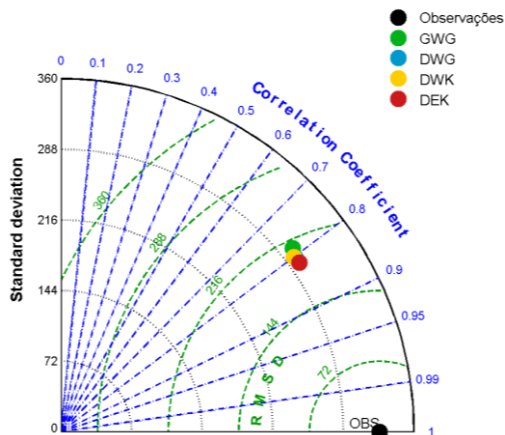


Figura 13: Representação das medidas de erro no diagrama de Taylor, para o domínio D03, no período 24 e 25 de Março 2011, para a estação do LREC (a) e a estação da Bica da Cana (b)

No período de Julho de 2011 (figura 14), a combinação DEK apresenta o melhor resultado para a estação do LREC para ambos os domínios (D02 não é mostrado). Para a Bica da Cana, já é a combinação GWG que apresenta melhor resultado. Neste mês, verifica-se para ambos os domínios que a Bica da Cana apresenta valores com menor coeficiente de correlação e maior RMS, comparativamente ao LREC.

(a)

18 a 19 de Julho 2011 – Domínio D03



(b)

18 a 19 de Julho 2011 – Domínio D03

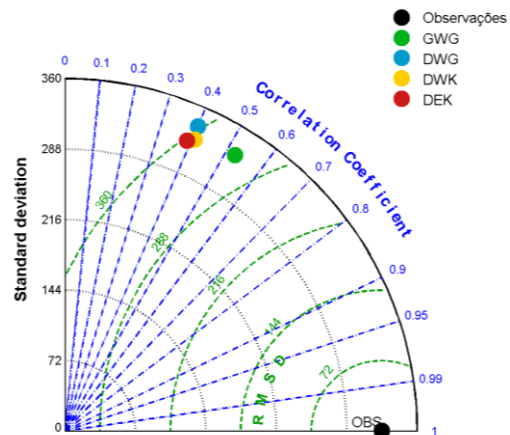


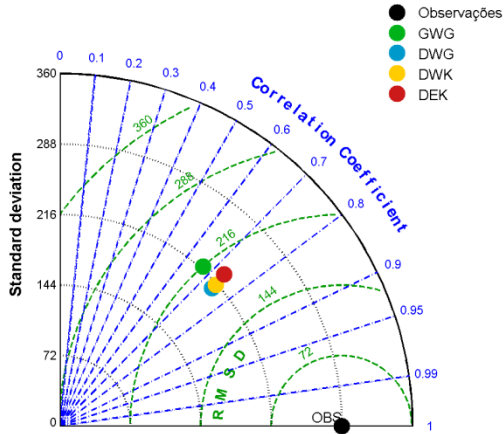
Figura 14: Representação das medidas de erro, no diagrama de Taylor, para o domínio D03, no período 18 a 19 de Julho 2011, para a estação do LREC (a) e a estação da Bica da Cana (b)

Os diagramas apresentados na figura 15, referem-se ao período 7 e 8 de Outubro de 2011, para a estação do LREC (figuras da esquerda) e para a estação localizada na Bica da Cana (figuras da direita), para os domínios D03 (figuras de cima) e D02 (figuras de baixo). Para a estação do LREC, figura 15 (a) e (c), verifica-se uma resposta semelhante para a combinação GWG para ambos os domínios. Para esta estação, os resultados para o domínio D03, não mostram destaque para nenhuma combinação como sendo a melhor, mas para o domínio D02 a combinação GWG apresenta a melhor prestação. Na estação da Bica da Cana, há uma preferência para GWG, no domínio D03. Este comportamento não se

mantem no domínio D02, já que apesar de as combinações DEK e GWG apresentam resultados semelhantes contudo DEK mostra um melhor coeficiente de correlação e menor RMSD.

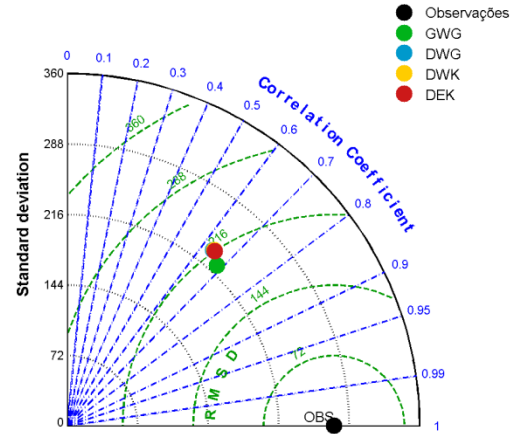
(a)

7 a 8 de Outubro de 2011 - Domínio D03



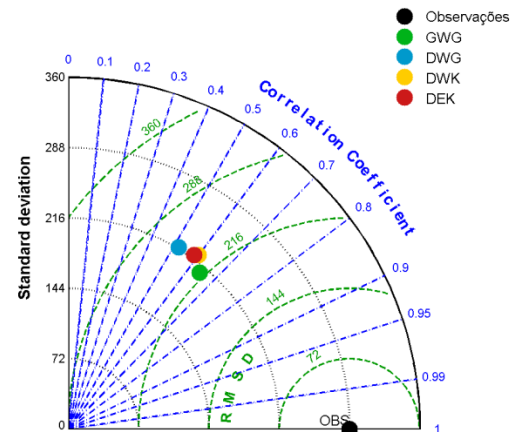
(b)

7 a 8 de Outubro de 2011 - Domínio D03



(c)

7 a 8 de Outubro de 2011 - Domínio D02



(d)

7 a 8 de Outubro de 2011 - Domínio D02

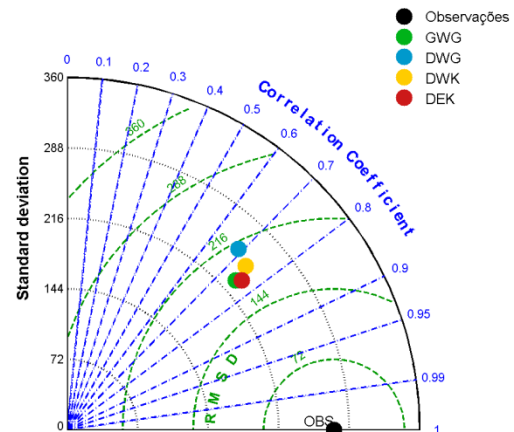


Figura 15: Representação das medidas de erro no diagrama de Taylor, para o domínio D03 (em acima) e para o domínio D02 (em baixo) no período 7 e 8 de Outubro 2011, para a estação do LREC (esquerda) e a estação da Bica da Cana (direita)

O melhor resultado foi apresentado para a estação do LREC, domínio D03 e no mês de Julho. Contudo, este resultado não se manteve na estação da Bica da Cana.

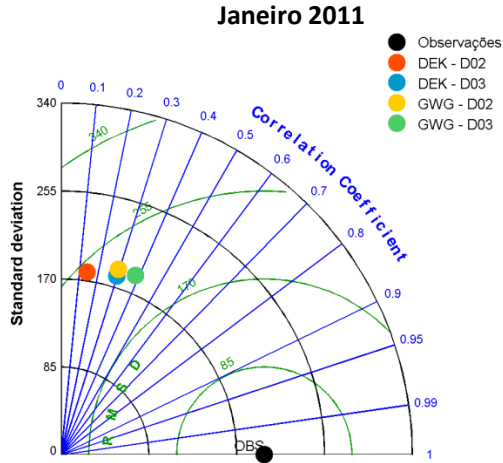
De uma forma geral, a pior prestação é apresentada para o Janeiro, para ambas a estações.

É no mês de Março que se verifica a maior diferença entre as combinações de esquemas escolhidos, para a estação do LREC. Mas, a resposta de todas as combinações é semelhante para o mesmo domínio e período. As combinações DWG e DWK nunca obtêm melhores resultado do que as combinações GWG e DEK. De forma geral, para a estação LREC a combinação DEK é a que apresenta os melhores resultados, já para a estação da Bica da Cana, vai alterando entre GWG e DEK. A partir destas conclusões, efetuaram-se simulações mensais para as combinações com melhores prestações e analisaram-se os resultados com mais detalhe.

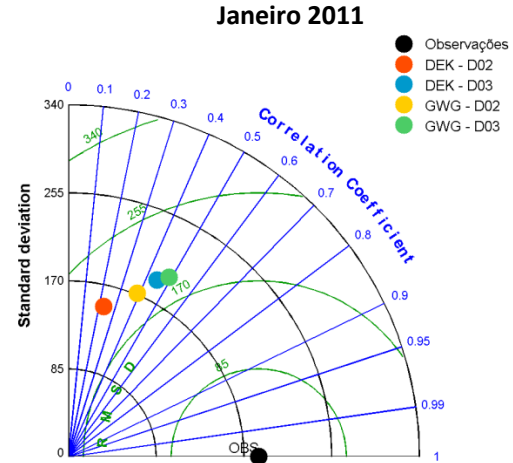
4.2.2 Parte 2

As combinações escolhidas foram **DEK** e **GWG**. Os resultados são apresentados no diagrama de Taylor, para a estação do LREC (figuras da esquerda) e estação da Bica da Cana (figuras da direita). As Figuras 16 (a) e (b) para o mês de Janeiro, (c) e (d) Março, (e) e (f) mês de Julho e por fim (g) e (h) para o mês de Outubro.

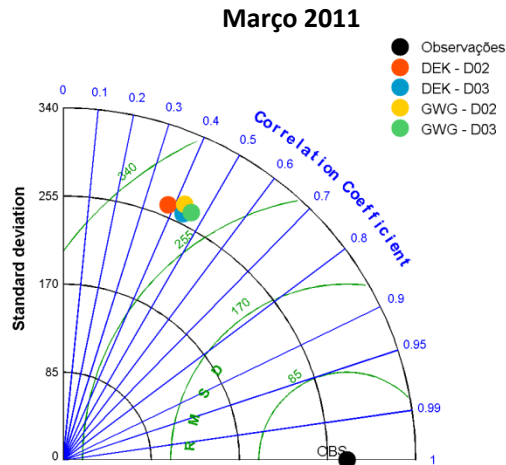
(a)



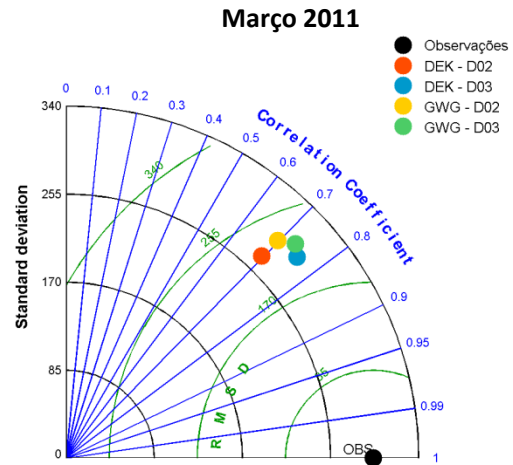
(b)



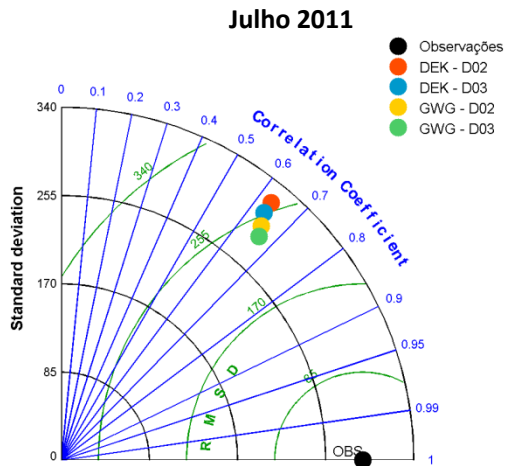
(c)



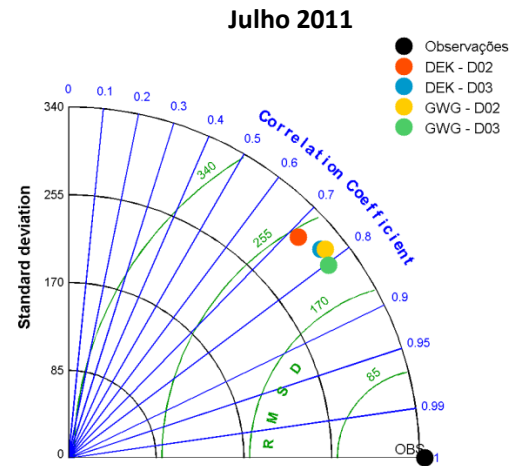
(d)



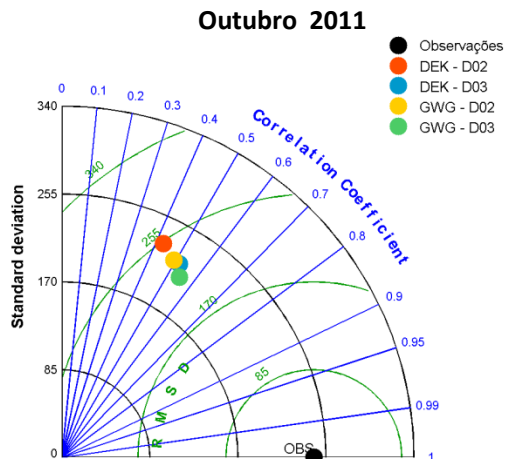
(e)



(f)



(g)



(h)

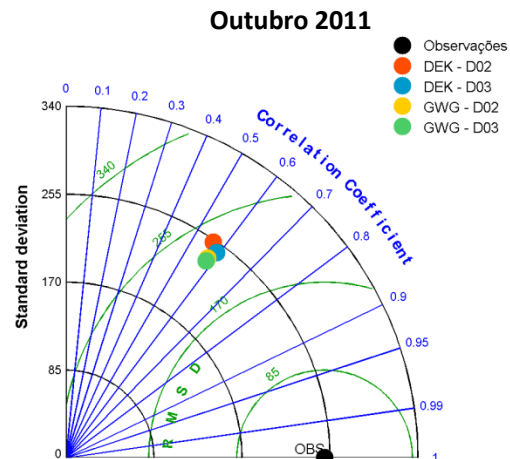


Figura 16: Representação das medidas de erro no diagrama de Taylor, para as combinações DEK e GWG, para ambos os domínios, mês de Janeiro (a) e (b), Março (c) e (d), Julho (e) e (f) e por fim Outubro (g) e (h) do ano 2011 para a estação do LREC (esquerda) e a estação da Bica da Cana (direita)

Para o mês de Janeiro (figura 16 (a) e (b)), verifica-se uma melhor prestação para a combinação GWG no domínio menor em ambas as estações da ilha da Madeira. Para além disso, a estação da Bica da Cana apresenta melhor correlação. Para o mês de Março (figura 16 (c) e (d)), ao contrário do que acontece para Janeiro, as estações não estão em concordância em relação à melhor combinação. A estação da Bica da Cana, apresenta melhor resultado para DEK, domínio D03, mantendo-se como melhor combinação a GWG, no domínio D03 para o LREC. O mês de Julho apresenta o maior STD e para ambas as estações e a melhor prestação é para GWG, domínio D03 e logo a seguir a mesma combinação mas para o domínio D02. Por fim, para o mês de Outubro, para estação do LREC é a combinação GWG, domínio D03 que apresenta o coeficiente de correlação maior. Para a Bica da Cana, as maiores correlações são obtidas para a combinação DEK no domínio D03, apesar de as restantes combinações nesta estação exibirem contribuições semelhantes. Relativamente à estação do LREC, a estação da Bica da Cana mostra sempre uma prestação superior, para o mesmo mês. A estação do LREC está localizada numa zona urbanizada e, por isso, o modelo poderá ter maior dificuldade em caracterizar as condições atmosféricas. Para além disso as estações encontram-se a altitudes diferentes, sendo superior na Bica da Cana. De todas as estações, de todos os períodos, é para a estação da Bica da Cana e durante o mês de Julho que se obtém a melhor correlação, uma boa concordância entre dados simulados e observados. A pior prestação é exibida para a combinação DEK para o domínio D02. Tendo isto em consideração, irá ser feita uma análise mais detalhada para o domínio menor pois, de uma forma geral, o domínio D02 apresenta sempre a pior prestação comparativamente ao domínio D03. Porém, observando-se todas as medidas de erro calculadas verifica-se que, para os meses quentes (Março e Julho), por vezes a prestação de D03 é semelhante à de D02 para ambas as combinações. As tabelas 9 (DEK) e 10 (GWG) mostram as medidas de erro para a estação do LREC, com um passo temporal horário. Para todos dos períodos e combinações a hipótese nula é rejeitada para o nível de significância de 5%, ou seja, o conjunto de dados não pertence a mesma distribuição. De uma forma geral, a combinação GWG apresenta melhor prestação (considerando RMS, STD e R), como mostrado nos diagramas de Taylor. Porém, é para esta combinação que se verifica, em todos os períodos, o maior valor de viés, maiores desvios.

Tabela 9: Resultado das medidas de erro, com um passo temporal de 1 hora, da estação do LREC, para a combinação DEK e domínio D03.

Período	N	MB [Wm ⁻²]	RMS [Wm ⁻²]	STD [Wm ⁻²]	rMB [%]	rRMS [%]	rSTD [%]	R	h	p
Jan-11	242	81,11	238,42	224,20	29,64	87,12	81,93	0,30	1	3,3x10 ⁻⁵
Mar-11	308	114,68	307,65	285,47	29,22	78,39	72,74	0,44	1	5,9x10 ⁻⁶
Jul-11	360	92,88	272,82	256,52	19,91	58,48	54,98	0,63	1	2,8x10 ⁻⁴
Out-11	292	60,10	235,84	228,05	16,89	66,29	64,10	0,52	1	8,8x10 ⁻⁴

Tabela 10: Resultado das medidas de erro, com um passo temporal de 1 hora, da estação do LREC, para a combinação GWG e domínio D03

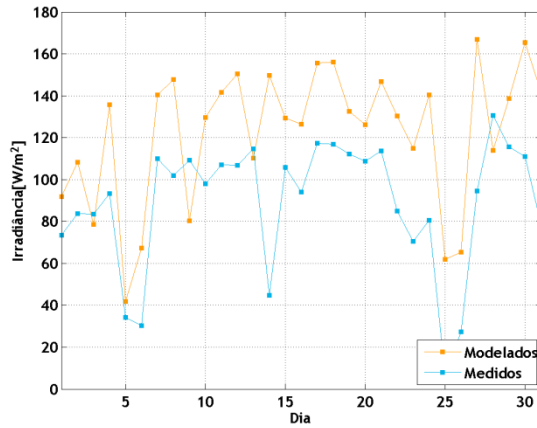
Período	N	MB [Wm ⁻²]	RMS [Wm ⁻²]	STD [Wm ⁻²]	rMB [%]	rRMS [%]	rSTD [%]	R	h	p
Jan-11	242	101,35	236,47	213,65	37,04	86,41	78,07	0,38	1	5,5x10 ⁻⁶
Mar-11	308	149,92	319,44	282,07	38,20	81,40	71,88	0,46	1	3,5x10 ⁻⁹
Jul-11	360	115,33	263,97	237,44	24,72	56,58	50,89	0,66	1	3,8x10 ⁻⁵
Out-11	292	71,55	229,11	217,65	20,11	64,40	61,18	0,54	1	7,4x10 ⁻⁵

As combinações apresentam o mesmo comportamento. Os valores mais baixos de viés, RMS e STD são apresentados para o mês de Outubro e valores mais altos das mesmas medidas de erros para o mês de Março. A melhor concordância entre os dados simulados e medidos (maior valor de R) é sempre apresentada pelo mês de Julho.

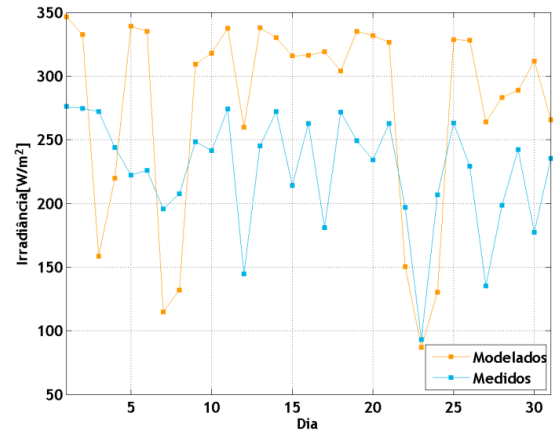
É mostrado com mais pormenor, a resposta do modelo para o mês de Janeiro (pior correlação) e para o de Julho (melhor correlação). A figura 17 (a) mostra a média diária da irradiância no mês de Janeiro, para D03 e estação do LREC, combinação DEK. Verifica-se em grande parte uma sobrestimação do modelo. O mesmo comportamento é partilhado pela combinação GWG (figura 17 (c)). Porém, a combinação GWG mostra uma maior sobrestimação, apesar de as variações entre as combinações serem semelhantes. A figura 17 (b) mostra a média diária da irradiância para o mês de Julho, combinação DEK. Assim como para Janeiro, verifica-se uma sobrestimação do modelo. No entanto, para o dia 3-4 e 7-8, verifica-se uma subestimação do modelo. No dia 23, o modelo tem uma boa resposta. Comparando com a média diária da irradiância para a mesma estação e domínio para a combinação GWG (figura 17 (c)), verifica-se igualmente uma sobrestimava do modelo. Mas, apesar de a subestimação se verificar nos mesmos dias em ambas as combinações, a menor diferença entre as medições e simulações é para a combinação do DEK, como se observa, por exemplo, para os dias 7 e 8. Neste mês verifica-se um valor elevado de coeficiente de correlação, sendo assim, existe elevada concordância entre os valores simulados e medidos apesar dos desvios (elevado viés).

Não é mostrada a irradiância média diária para os restantes meses, mas a sobrestimação é características de todos os períodos em estudo. O reduzido valor de viés para o mês de Outubro é devido ao facto do modelo ter o maior número de dias onde existe subestimação do modelo, comparativamente aos restantes períodos.

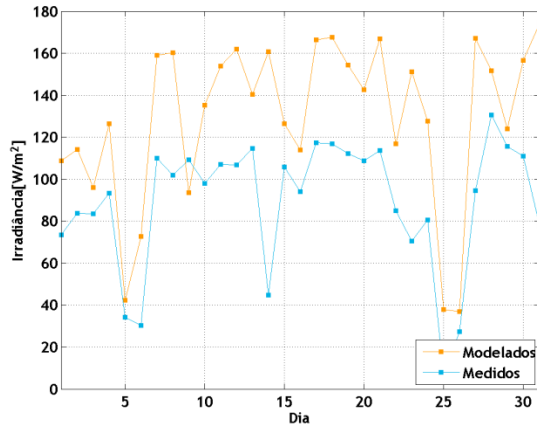
(a)



(b)



(c)



(d)

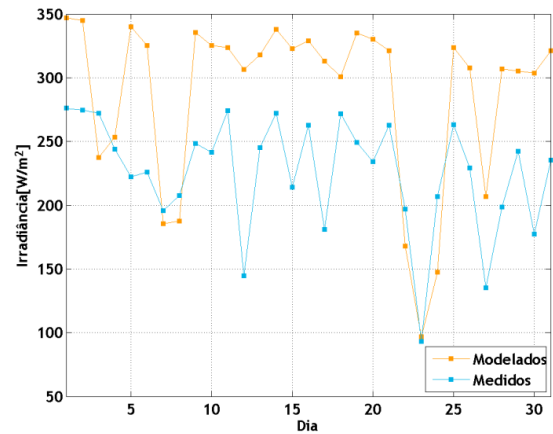


Figura 17: Valores médios diários da irradiância para os valores simulados (laranja) e medidos (azul) obtidos na estação do LREC, para o mês de Janeiro (esquerda), para a combinação DEK (a) e GWG (c) e para o mês de Julho (direita) para a combinação DEK (b) e GWG (d), para o domínio D03

O K_t em função do ângulo de elevação é semelhante para todos os períodos, domínios e até mesmo combinações. A figura 18, mostra o K_t para o domínio d03, mês de Julho e para a combinação DEK. Para ambos os dados (medidos e modelados) o K_t aumenta como aumento da elevação solar. Para ângulos de elevações pequenos verifica-se uma diferença mais acentuada entre os valores medidos e simulados, sendo que os valores medidos são menores. Por outro lado, verifica-se maior dispersão dos valores medidos comparativamente aos valores simulados pelo modelo. Os valores modelados apresentam-se concentrados numa faixa.

Esta distribuição, para além de mostrar a sobrestimação feita pelo modelo, mostra a dificuldade que o modelo apresenta na representação de aerossóis (visível em ângulos baixos). O aumento de AM, produz um aumento na dispersão, presente em ângulos de elevação baixos, resultando em valores de K_t nulos (mostrado pelos dados medidos).

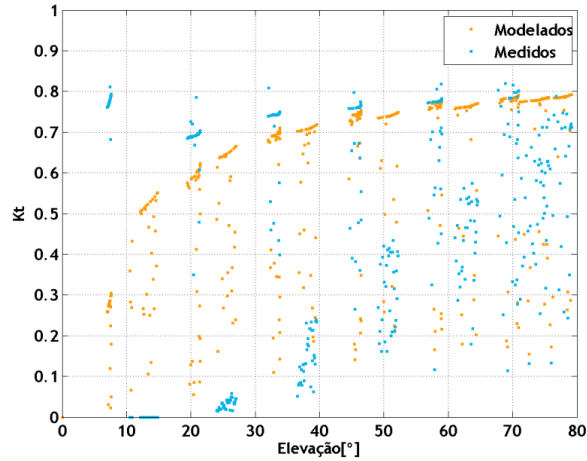
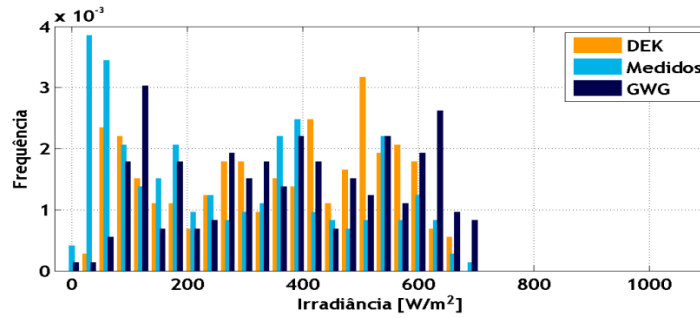


Figura 18: Representação de Kt em função da elevação solar para o mês de Julho, domínio D03 e a combinação DEK.

De todas as distribuições da irradiância, a que apresenta a maior diferença entre as combinações (GWG e DEK) para o domínio d03 é o mês de Janeiro. A figura 19 mostra o histograma da irradiância para as duas combinações para Janeiro domínio D03 (figura 19 a) e domínio D02 (figura 19 b). Para ambos os domínios observa-se que não existe nenhum padrão de diferenças entre as distribuições medidas e simuladas para as duas combinações. No domínio D03, a combinação GWG tem maior frequência em valores mais elevados de irradiância comparativamente a DEK. Para valores mais baixos, a combinação DEK apresenta maior frequência. No domínio D02, as diferenças entre as distribuições das duas combinações é menor comparativamente ao domínio D03. Para valores baixos de irradiância ($< 90 \text{ W}^2/\text{m}$), existe uma diferença acentuada da distribuição dos dados simulados e a combinação GWG.

(a)



(b)

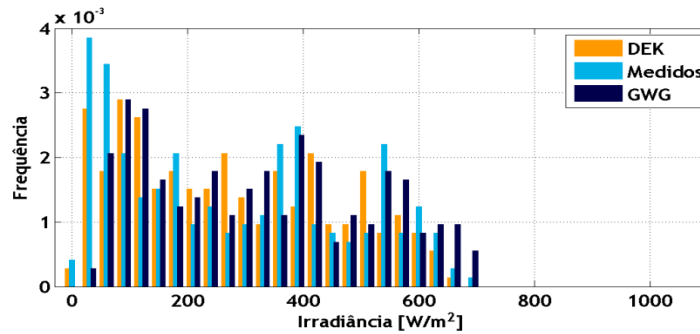


Figura 19: Histograma da irradiância (W^2/m), para o mês de Janeiro, domínio D03 (a) e D02 (b), estação do LREC para a combinação DEK (laranja) e GWG (azul escuro).

As medidas de erro para a Bica da Cana, são mostrados nas tabelas 11 e 12, para a combinação DEK e GWG, respetivamente. De notar que para as combinações, para o mês de Março, não existe rejeição da hipótese nula (conjunto de dados pertencem à mesma distribuição), sendo o valor de p maior comparativamente aos restantes meses. Todavia, o valor de coeficiente de correlação mais elevado é apresentado para o mês de Julho, para as duas combinações, como acontece para a estação do LREC, maior concordância entre os dados medidos e simulados. Analisando cada mês, apenas o mês de Março dá amostra melhores resultados com a combinação DEK. Assim como acontece com a estação do LREC, o mês de Janeiro é aquele que apresenta o menor coeficiente de correlação e uma sobrestimação significativa por parte do modelo, observando-se os valores diários de irradiância em ambas as estações. Contudo, nesta estação têm um valor inferior (não mostrado). No entanto, o modelo consegue simular a aproximação e passagem de sistemas frontais ou depressões.

Ao contrário da estação analisada anteriormente, nenhuma combinação se destaca como melhor.

As figuras 20 (a) e (b) mostram a irradiância média diária para o mês de Março, domínio D03, combinação DEK e GWG, respetivamente. O conjunto de dados de ambas as combinações pertence a mesma distribuição ($h=0$). A combinação GWG (figura (b)) mostra uma sobrestimação por parte do modelo, para os dias 4 a 12. Essa sobrestimação, apesar de também se verificar com a combinação DEK, não tem valores mais elevados do que a GWG. A combinação DEK tem uma melhor prestação. Contudo as combinações não mostram respostas muito diferentes. Esta conclusão é partilhada para os restantes períodos. Comparando esta estação com a estação anterior (LREC), verifica-se uma variação mais acentuada entre a primeira e a segunda metade do mês.

Ao observar-se a irradiância média diária para o mês de Julho (não mostrado), verifica-se uma sobrestimativa em toda a série de dados do modelo, sendo que o rMB diário para este mês é superior a 20%.

Tabela 11: Resultado das medidas de erro, com um passo temporal de 1 hora, da estação da Bica da Cana, para a combinação DEK e domínio D03.

Período	N	MB [Wm ⁻²]	RMS [Wm ⁻²]	STD [Wm ⁻²]	rMB [%]	rRMS [%]	rSTD [%]	R	h	p
Jan-11	243	40,13	201,36	197,32	16,65	83,54	81,87	0,45	1	$1,5 \times 10^{-2}$
Mar-11	332	32,68	210,14	207,59	8,12	52,22	51,58	0,75	0	0,18
Jul-11	378	147,54	269,94	226,04	27,50	50,31	42,13	0,77	1	$5,4 \times 10^{-6}$
Out-11	290	55,98	230,98	224,10	14,70	60,66	58,85	0,59	1	$5,4 \times 10^{-3}$

Tabela 12: Resultado das medidas de erro, com um passo temporal de 1 hora, da estação da Bica da Cana, para a combinação GWG e domínio D03.

Período	N	MB [Wm ⁻²]	RMS [Wm ⁻²]	STD [Wm ⁻²]	rMB [%]	rRMS [%]	rSTD [%]	R	h	p
Jan-11	243	73,13	207,24	193,90	30,34	85,98	80,45	0,49	1	$2,7 \times 10^{-4}$
Mar-11	332	64,18	229,21	220,04	15,95	56,95	54,68	0,73	0	$5,7 \times 10^{-2}$
Jul-11	378	169,30	268,87	208,87	31,55	50,11	38,93	0,80	1	$5,2 \times 10^{-7}$
Out-11	290	72,56	233,63	222,07	19,05	61,35	58,32	0,58	1	4×10^{-3}

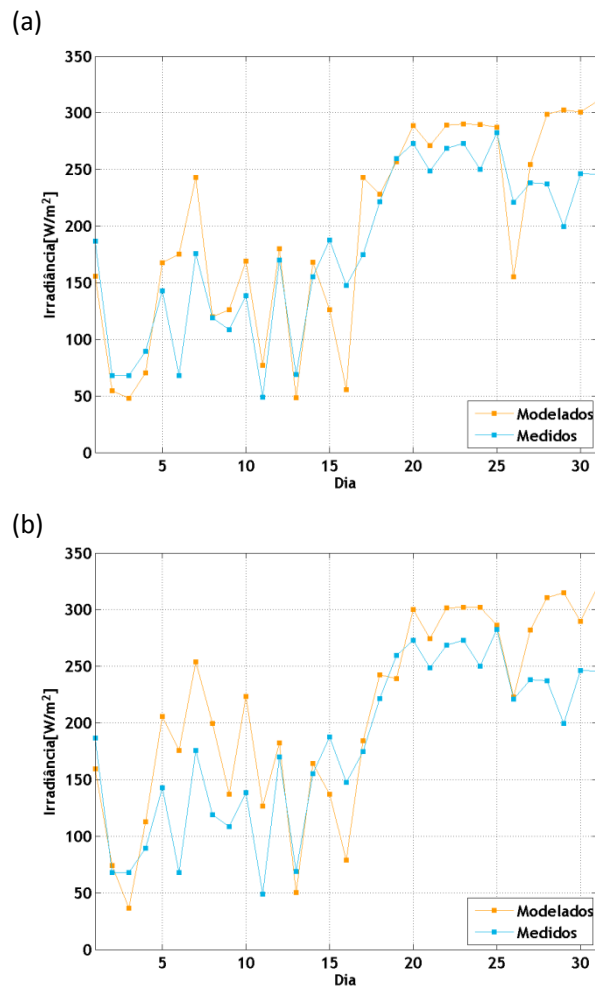


Figura 20: Valores médios diários da irradiância para os valores simulados (laranja) e medidos (azul) obtidos na estação da Bica da Cana, para o mês de Março para a combinação DEK (a) e GWG (b) no domínio D03

A figura 21 mostra o K_t em função da elevação solar, para o domínio D03, para o mês de Março e para a combinação DEK que é aquela que apresenta uma melhor prestação. Apesar de serem meses diferentes, o comportamento da distribuição K_t é semelhante ao observado para a estação do LREC no mês de Julho para a mesma combinação.

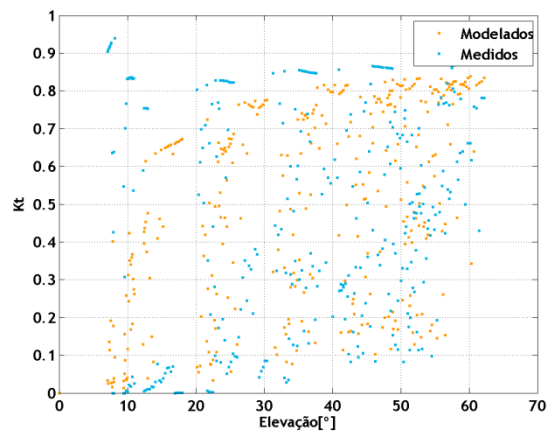


Figura 21: Representação de K_t em função da elevação solar para o mês de Março, domínio D03 e a combinação DEK.

Para além disso, o modelo apresenta sempre valores mais elevados comparativamente aos medidos, sendo essa diferença mais acentuada para valores de elevação pequenos. Para o mês de Julho (não mostrado) verifica-se uma diferença ainda mais significativa, onde os valores medidos estão concentrados mais a baixo e os valores simulados mais em cima no gráfico. Observando-se a distribuição para o mês de Março, D03 (figura 22), verifica-se uma predominância de baixos valores de irradiância. Contudo, existe uma distribuição uniforme em toda a gama de valores de irradiância.

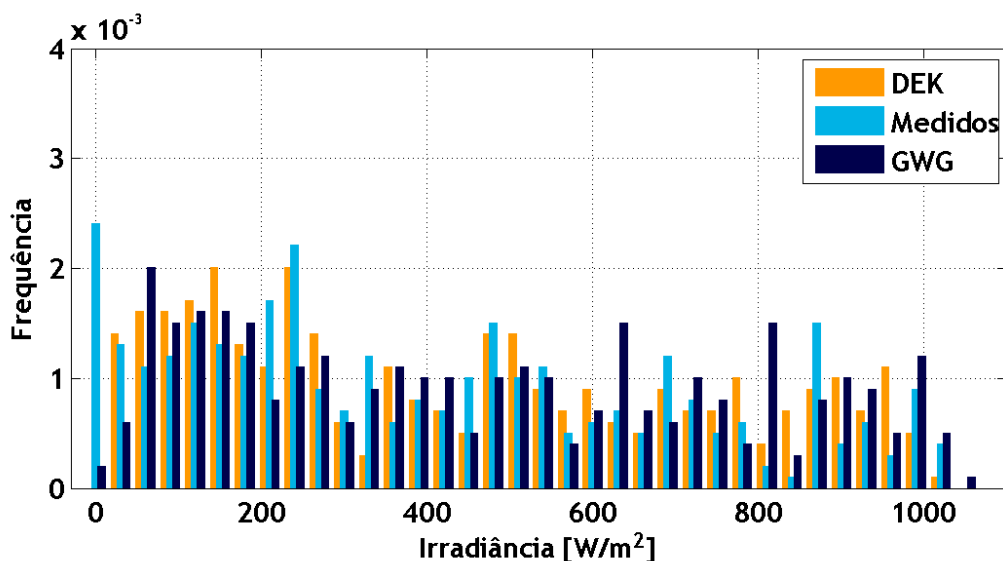


Figura 22: Histograma da irradiância (W^2/m), para o mês de Março, domínio D03, ambas as combinações (DEK (laranja) e GWG (azul escuro)) para a estação da Bica da Cana.

Observando-se os diagramas de Hovmöller (figura 7) verifica-se que a maior irradiância é para o mês de Julho e na estação da Bica da Cana. Também neste período e estação que se verifica a maior concordância entre os dados medidos e simulados (coeficiente de correlação maior). A menor irradiância é apresentada pelo mês de Janeiro (figura 7) e para este mês que se verifica o valor mais baixo de correlação.

Considerando os critérios descritos em 3.5.1 verifica-se que a estação da Bica da Cana apresenta resultados com uma melhor prestação comparativamente a estação do LREC. Para esta estação, numa comparação entre domínios, o D03 apresenta os melhores resultados.

Na comparação entre combinações, as condições mostram que a combinação DEK apresenta uma melhor prestação para a estação da Bica da Cana. Contudo para a estação do LREC não se evidencia nenhuma combinação como sendo a melhor. Verificou-se, principalmente para estação do LREC, que o domínio D02 mostra resultados muito semelhantes e por vezes um pouco melhores para o mês de Março e Julho. De todos os meses, Março é o mês em que o modelo tem um resultado mais próximo das medições, na estação da Bica da Cana.

4.3 Comparação entre estações

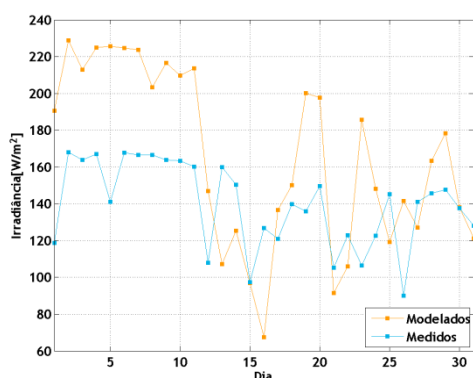
As estações em análise (Corvo, LREC e Bica da Cana) têm características diferentes e em função dessas características, apresentam respostas diferentes do modelo. Nesta secção ir-se-ão comparar os resultados das estações, para o mesmo período (Outubro), modelo de decomposição (DIRINT) e para os esquemas de parametrização descritos na tabela 1. Na tabela 13 são mostradas as médias mensais da irradiância para o mês de Outubro e o erro médio, no domínio D03, para as três estações. Verifica-se que a estação localizada nos Açores apresenta um menor valor de radiação global e as estações localizadas na Madeira maior valor. Isto é devido a localização dos arquipélagos e ao tempo ocorrido neste mês de Outubro. Os Açores têm maior latitude comparativamente à Madeira. A pior prestação é observada para a estação do LREC, que está localizada numa zona urbanizada, concluindo-se assim que o modelo tem maior dificuldade em simular zonas urbanas. Para além disso, a estação da Bica da Cana tem uma maior altitude. Para as estações localizadas na Madeira, o modelo sobrestima a radiação global enquanto, para os Açores, o modelo subestima. Para o domínio D02, para a ilha da Madeira (não mostrado), verifica-se que o erro menor viés, mas um pior RMS e STD.

Tabela 13: Médias mensais da irradiância para o mês de Outubro e o erro médio (sem exclusão de valores noturnos), no domínio D03, das três estações (Cadência de amostragem de 10 min para o Corvo e para as estações localizadas na ilha da Madeira é horaria).

Estação	Radiação Global Horizontal [W/m^2]		Erro (%)
	Medições	Simulações	
Corvo	102,4	97,6	-4,69
LREC	139,6	165,3	18,38
Bica da Cana	148,4	172,3	16,11

Na figura 23 mostram-se valores médios diários da irradiância para a estação do LREC para o domínio D03 (a) e domínio D02 (b). Ambos os domínios apresentam uma sobrestimativa do modelo, principalmente nos primeiros 10 dias do mês. O domínio D02 apresenta um menor sobrestimativa comparando com D03, traduzido pelo menor valor de rMB, mas apresenta uma menor correlação.

(a)



(b)

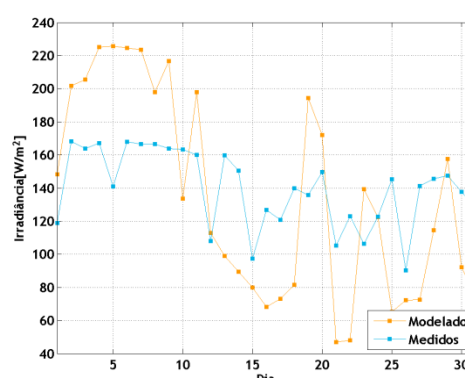


Figura 23: Valores médios diários da irradiância para os valores simulados (laranja) e medidos (azul) obtidos na estação do LREC, para o mês de Outubro, para a combinação DEK e o domínio D03 (a) e para o domínio D02 (b).

4.4 Comparação entre formulações de céu limpo (ESRA vs SOLIS simplificado)

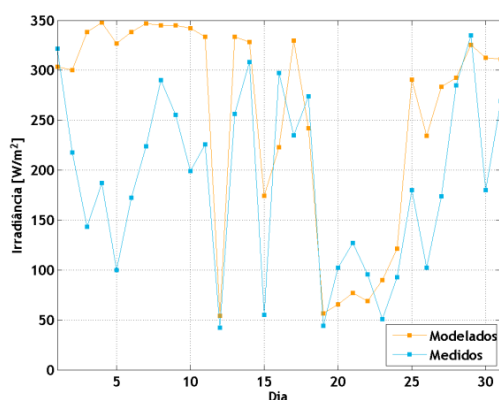
O modelo contém várias formulações de céu limpo. Até agora foram mostrados resultados apenas para uma dessas formulações (ESRA), nesta seção são mostrados os resultados obtidos para a outra formulação. Efetuaram-se alguns testes e serão apresentados e discutidos resultados apenas para uma estação. Na tabela 14 são mostradas as medidas de erro calculadas, para a ilha do Corvo para as duas formulações disponíveis no Re.SunTM nos períodos em estudo. De uma forma geral, para esta estação e domínio, nos meses em análise verificou-se que ESRA apresenta a melhor prestação. Para o mês de Outubro, Solis apresenta um valor de rMB de -7,4%, enquanto o ESRA tem rMB de -4,7%, o que representa uma subestimativa do modelo para ambas as formulações. No mês de Março, o comportamento de ambos é semelhante, mas melhores resultados são obtidos para o ESRA. No mês de Julho, SOLIS simplificado apresenta um valor de rMB inferior (0,9%) um desvio menor entres os dados simulados e medidos, ou seja, uma sobrestimação menor do modelo com a formulação SOLIS simplificado. Porem, o coeficiente de correlação é superior quando usada a formulação ESRA.

Tabela 14: Resultados das medidas de erro, para o domínio D03, modelo DIRINT, combinação DEK na estação do Corvo com as duas formulações (ESRA e SOLIS simplificado)

Período		N	MB [Wm ⁻²]	RMS [Wm ⁻²]	STD [Wm ⁻²]	rMB [%]	rRMS [%]	rSTD [%]	R
Out-11	ERSA	1837	-11,7	145,1	144,6	-4,7	58,3	58,1	0,72
	SOLIS	1765	-18,9	144,1	142,9	-7,4	56,4	55,9	0,72
Mar-12	ERSA	2036	34,2	214,9	212,2	12,6	79,2	78,2	0,58
	SOLIS	1994	34,8	214,9	212,1	12,7	78,4	77,4	0,57
Jul-12	ERSA	2490	117,9	238,3	207,1	34,9	70,5	61,3	0,77
	SOLIS	2420	117,8	239,1	208,1	34,0	69,0	60,0	0,76

A figura 24 mostra os valores médios da irradiância, para o mês de Julho para ambas as formulações. Não se observam diferenças entre as simulações. Este resultado é comum para os restantes períodos e até mesmo para as restantes estações (Madeira). Não se verificam diferenças significativas entre as formulações, sendo a ERSa que apresenta, na maioria dos casos, os melhores resultados.

(a)



(b)

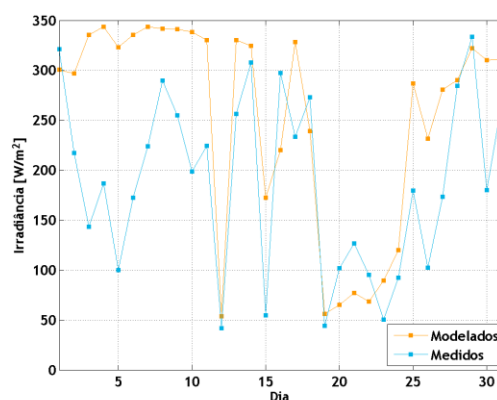


Figura 24: Valores médios diários da irradiância para os valores simulados (laranja) e medidos (azul) obtidos na estação do Corvo, para o mês de Julho, para a combinação DEK e o domínio D03, para a formulação ESRA (a) e para a SOLIS (b).

Capítulo 5 . Conclusão

O modelo Re.SunTM utiliza resultados do modelo atmosférico WRF para correção de resultados de simulações em condições céu limpo, através de um processo de acoplamento dinâmico que faz uso de, técnicas de interpolação e decomposição da radiação solar, integração do efeito de gases e aerossóis, assim como, a contabilização do efeito do terreno a uma maior resolução para cálculo do déficit por sombreamentos. Este trabalho tem como objetivo principal testar a sensibilidade a diferentes resoluções de malha e parametrizações do modelo WRF para a sugestão de uma configuração padrão. Para a configuração padrão e validação são utilizados dados de irradiância medidos em estações localizadas na ilha dos Açores (Corvo) e na ilha da Madeira (LREC e Bica da Cana) facultados pela MegaJoule Inovação. Cada uma destas estações possui enquadramentos físicos e climáticos diferentes. O Re.SunTM permite a utilização de vários modelos de decomposição e o código é executado segundo os modelos ESRA e SOLIS simplificado. Os resultados foram analisados de forma a avaliar separadamente, a sensibilidade do modelo a diferentes conjuntos de parametrizações e resoluções de malha. Com este intuito efetuaram-se testes utilizando todos os modelos de decomposição mas apenas foram discutidos os resultados de três (DIRINT, S&O e BRL), o esquema de parametrização DEK e a formulação ESRA para a estação localizada na ilha do Corvo. Os períodos em análise foram Outubro de 2011 e Março e Julho de 2012. Os modelos de decomposição têm como principal finalidade decompor a radiação global em direta e difusa. A radiação difusa é influenciada principalmente pela turbidez atmosférica. Verificou-se que os modelos de decomposição apresentam resultados semelhantes. Porém, o modelo DIRINT mostra ser o mais robusto. Quando não apresenta a melhor prestação a diferença entre as medidas de erros apresentadas pelo modelo com a melhor prestação e apresentadas pelo modelo DIRINT não é significativa. O modelo parece conseguir reproduzir a radiação global ocorrida para o mês de Outubro para o domínio D03, sendo pior para o mês de Julho. Nos meses de Março e Julho, o domínio D02 apresenta melhores resultados. No mês de Julho o modelo apresenta uma sobrestimativa mais elevada. O modelo mostra dificuldade em simular corretamente a convecção originada por instabilidades térmicas à superfície, sendo o caso do mês de Julho, e o desenvolvimento de estratocúmulos formados durante a noite e que se desenvolveram devido à convecção diurna e/ou por efeito orográfico. O mês de Julho apresenta o maior coeficiente de correlação e o valor mais elevado de rMB.

Efetuaram-se testes a várias combinações de parametrizações (tabela 2) para as duas estações localizadas na ilha da Madeira, dado que o modelo de decomposição DIRINT mostrou a melhor prestação, este foi mantido. Os testes foram realizados para um período de 2 dias, apenas, pretendendo-se simular dias de céu limpo ou quase limpo.

Das combinações testadas, as que apresentaram melhor prestação foram as GWG e DEK. Realizaram-se simulações mensais para estas duas combinações. Os períodos em estudo foram, Janeiro, Março, Julho e Outubro de 2011. A estação do LREC apresenta resultados semelhantes para ambas as combinações, embora a combinação GWG apresente uma maior sobrestimativa mas em contrapartida maior correlação relativamente aos dados medidos. O menor valor de viés é simulado para Outubro devido ao facto de o modelo ter o um maior número de dias onde existe subestimação. Nesta estação (LREC) o domínio D02 apresenta resultados semelhantes e por vezes melhores comparativamente ao domínio D03, para o mês de Março e Julho.

A estação da Bica da Cana, localizada numa zona rural, mostra melhores resultados quando comparada com a outra estação localizada nessa ilha (LREC).

Essa estação apresenta resultados semelhantes para ambas as combinações, embora as condições descritas em 3.5.1 indiquem que a combinação DEK obtenha melhores resultados. Para Março não existe rejeição da hipótese nula, que indica que o conjunto de dados pertence à mesma combinação, sendo o valor de p maior comparativa aos restantes meses. Como acontece na estação do LREC, o mês de Julho apresenta a maior diferença entre as médias e o valor mais elevado de coeficiente de correlação, relativamente aos dados observados. Nos meses de Verão, para além da complexa orografia, existente um contraste térmico entre a região oceânica e continental promovendo um movimento ascendente sobre as regiões de terra. Assim, devido à condensação do ar ocorre formação de nuvens e nevoeiro em terra.

Na representação do K_t em função do ângulo de elevação foi característico, em todas as malhas de resolução e esquemas de parametrizações, uma diferença mais acentuada entre valores medidos e simulados, em que os valores medidos tinham menor valor, para pequenos ângulos de elevação solar. Uma elevação solar pequena é caracterizada por uma maior AM, provoca um aumento na dispersão da radiação resultando em valores baixos e/ou nulos de K_t .

Na comparação entre estações, para o mês de Outubro, verifica-se que a estação do Corvo tem um menor valor de radiação global, em parte devido ao facto de esta ter maior latitude. A pior prestação é apresentada pela estação LREC. A estação da Bica da Cana tem uma altitude maior e é nesta estação que se verifica o máximo de radiação medida e simulada. Para além disso, o passo temporal com que são calculadas as medidas de erros é diferente, sendo de 10 min para a ilha dos Açores e de horários para a ilha da Madeira.

Ao efetuarem-se alguns testes entre as duas formulações (ESRA e SOLIS simplificado), não se verificaram diferenças significativas entre estas duas formulações, no entanto a ESRA apresenta, na maioria, os melhores resultados. A formulação ESRA irradiância não foi testada nem comparada, uma vez que as diferenças não são significativas (ver figura 3).

Em suma, o mês de Julho é caracterizado por um elevado valor de viés, RMS e STD e R, apresentando por vezes melhores resultados no domínio D02. Os meses frios são caracterizados por valores mais baixos de viés e STD com também com um valor baixo de coeficiente de correlação, observando-se que não há um conjunto de esquemas de parametrização e resolução de malha que seja o melhor em todas as situações.

Referências

- Alsamamra H., Ruiz-Arias J. A., Tovar-Pescador J., Pozo-Vázquez D., 2009. A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 23 (8), 1049-1076.
- Badescu V., 2008. *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*. Springer, Berlin, Germany.
- Beyer H.G., Polo J., Suri M., Torres J. L., Lorenz E., Müller S. C., Hoyer-Klick , C., Ineichen P., 2009.D 1.1.3 Report on Benchmarking of Radiation Products, in MESOR – 038665 Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge.
- Boland J., Huang, J., Ridley B., 2012. Decomposing global solar radiation into its direct and diffuse components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 749-756.
- Boland J., Ridley B., 2007. Recent advances in modelling diffuse radiation. In *Proceedings of ISES Solar World Congress 2007: Solar energy and human settlement*.
- Boland J., Scott L., Luther M., 2001. Modeling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. *Environmetric*, 12,103-116.
- Borge R., Alexandrov V., Vas J. J., Lumberras J., Rodriguez E., 2008. A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula. *Atmos. Environ.*, 42, 8560–8574.
- Bossard M., Feranec J., Otahel J., 2000. *Corine land cover technical guide addendum 2000*. Technical report, European Environment Agency.
- Bourges G., 1979. Reconstitution des courbes de fréquence cumulées de l'irradiation solaire globale horaire rec,ue par une surface plane. In *Report CEE 295-77-ESF*, Vol. tome II, Centre d'Energétique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, France.
- Bowman A. W., Azzalini A., 1997. *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis*. New York: Oxford University Press Inc.
- Brichambaut C. P., Vauge C., 1982. *Le gisement solaire: evaluation de la ressource énergétique, Technique et documentation* (Lavoisier), Paris.
- Cano D., Monget J. M., Albuissou M., Guillard H., Regas N., Wald L., 1986. A method for the determination of global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy* 37, 31–39.
- Chandrasekhar S., 1960. *Radiative Tranfer*, Courier Dover Publications, 1-40.
- Chen F., Dudhia J., 2001. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569–585.
- Chou M.-D., Suarez M. J., 1994. An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, NASA Tech, Memo. 104606, 3, 85.
- Cox D. R., Oakes D., 1984. *Analysis of Survival Data*. London: Chapman & Hall.
- Disponível em: http://www.mesor.org/docs/MESoR_Benchmarking_of_radiation_products.pdf
- Dozier J., Bruno J., Downwy P., 1980. A Faster solution to the horizon problem. *Compa* 7, 145-151.
- Dudhia J., 1989. Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077–3107.

- Dumortier D., 1995. Modelling global and diffuse horizontal irradiances under cloudless skies with different turbidities. Final Report J0U2-CT92-0144, Daylight II, Ecole images Nationale des Travaux Publics de l'E'tat, Vaulx-en-Velin, . Accuracy ele- France.
- ECMWF projects: http://www.ecmwf.int/research/EU_projects/, acedido em Setembro 2013
- Erbs D. G., Klein S.A., Duffie J.A., 1982. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 28, 293–302.
- Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D., 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45, 1–33.
- Ferreira A., 2007. Sensibilidade às parametrizações físicas do WRF nas previsões à superfície em Portugal Continental, Dissertação não publicada (Estágio em Meteorologia e Oceanografia Física), Universidade de Aveiro.
- Fung K. K., Ramaswamy V., 1999. On shortwave radiation absorption in overcast atmospheres. *Journal of Geophysical Research* 104: doi: 10.1029/1999JD900457. issn: 0148-0227.
- Gilliland E. K., Rowe C. M., 2007. A comparison of cumulus parameterization scheme in the WRF model. In *Proceedings of the 21th Conference on Hydrology*, San Antonio, Tex, USA.
- Grell G. A., Devenyi D., 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, 29(14), Article 1693.
- HelioClim, 2011. HelioClim Solar Radiation. Available: <http://www.helioclim.org/linke>.
- Hong S. Y., Lim J. O. J., 2006. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129–151.
- Hong S.-Y., Noh Y., Dudhia J., 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341.
- Ineichen P., 2008. A broadband simplified version of the Solis clear sky model. *Solar Energy*, 82(8), 758–762.
- Iqbal M., 1983. *An introduction to solar radiation*. Academic Press, ISBN: 978-0-12-373750-2.
- Kain J. S., 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170–181.
- Kneizys F. X., Abreu L. W., Anderson G. P., Chetwynd J. H., Shettle E. P., Berk A., Bernstein L. S., Robertson D. C., Acharya P., Rothman L. S., Selby J. E. A., Gallery W. O., Clough S. A., 1996. In *The MODTRAN 2 /3 Report and LOWTRAN 7 Model*. Technical Report, Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, Hanscom AFB.
- Lam J. C., Li D. H. W., 1996. Correlation between global solar-radiation and its direct and diffuse components. *Building and Environment*, 31(6), 527–35.
- Lanini F., 2010. Division of global radiation into direct radiation and diffuse radiation, Universidade de Berna.
- Liu B. Y. H., Jordan R. C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4, 1-9.
- Louche A., Notton G., Poggi P., Simonnot G., 1991. Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on French Mediterranean site. *Solar Energy*, 46, 261–6.
- Luna T., Rocha A., Carvalho A., Ferreira J., Sousa J., 2011. Modelling the extreme precipitation event over Madeira island on 20 february 2010. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2437–2452.

- M_Map: A Mapping package for Matlab: <http://www.eos.ubc.ca/~rich/map.html>, acedido em Setembro de 2013
- Marion W., Riordan C., Renné D., 1992. *Shining on: a primer on solar radiation data*. National Renewable Energy laboratory, Golden, Colorado, USA.
- Massey F. J., 1951. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. *Journal of the American Statistical Association*, 46, 253, 68–78.
- Maxwell A. L., 1987. A quasi-physical model for converting hourly global horizontal to direct normal insolation. Report SERI/TR-215-3087, Solar Energy Research Institute, Golden, CO.
- Mayer B., 2009. Radiative transfer in the cloudy atmosphere, *European Physical Journal Conferences*, 1, 75–99, doi:10.1140/epjconf/e2009-00912-1.
- Maze G., 2008, disponível em <http://codes.guillaumemaze.org/>.
- Miguel J., Bilbao R., Aguiar H., Kambezidis, Negro E., 2001. Diffuse solar irradiation model evaluation in the north mediterranean belt area. *Solar Energy*, 70, 143-153.
- Mlawer E. J., Taubman S. J., Brown P. D., Iacono M. J., Clough S. A., 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16663–16682.
- Mueller R. W., Dagestad K. F., Ineichen P., Schroedter M., Cros S., Dumortier D., Kuhlemann R., Olseth J. A., Piernavieja G., Reise C., Wald L., Heinemann D., 2004. Rethinking satellite based solar irradiance modelling - The SOLIS clear sky module. *Remote Sensing of Environment*, 91, 160-174.
- NASA: <http://atmospheres.gsfc.nasa.gov>, acedido em Setembro de 2013
- Oliveira A. P., Escobedo J. F., Machado A. J., Soares J., 2002. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil, *Applied Energy*, 71, 59-73.
- Orgill J. F., Hollands K. G. T., 1977. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, 19, 357–9.
- Page J. K., 1986. Prediction of solar radiation on inclined surfaces. *Solar Energy R&D in the European Community, Series F, 3, Solar Radiation Data*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Paltridge G. W., Proctor, D., 1976. Monthly mean solar radiation statistics for Australia, *Solar Energy*, 18, 235-243.
- Parrish and DiMego, 2001. web doc.
- Peixoto J. P., 1981. *A Radiação Solar e o ambiente, Secretaria de Estado do Ordenamento e Ambiente, Comissão Nacional do Ambiente*.
- Pereira R., 2013. Re.Sun™ -Validation White Paper. Comunicação Pessoal.
- Perez R., Ineichen, P., Maxwell, E., Seals, R., Zelenka, A., 1991. Dynamic global-to-direct irradiance conversion models. ISES Solar World Congress, Denver USA, 951-956.
- Perez R., Renne D., Seals R., Zelenka A., 1998. The strength of satellite-based solar resource assessment. Production of site/timespecific irradiances from satellite and ground data. Report 98-3. New York State Energy Research and Development Authority, Corporate Plaza West, 286 Washington Avenue Extension, Albany, NY 12203-6399.
- Perez, R., Ineichen, P., Maxwell, E., Seals, R., Zelenka, A., 1992. Dynamic global to direct irradiance conversion models. *ASHRAE Trans. Res. Series*, 354–369.
- Reindl D. T., Beckman W. A., Duffie J. A., 1990. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 45, 1–7.

- Remund J., Wald L., Page J., 2003. Chain of algorithms to calculate advanced radiation parameters. Proceedings of ISES Solar World Congress, Göteborg, Sweden, 16-19.
- Reno, M. J., Hansen C. W., Stein J. S., 2012. Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis. SAND2012 - 2389, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Ridley B., Lauret P., Boland J., 2010. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renew Energy*, 35 (2), 478–483.
- Rigollier C., Bauer O., Wald L., 2000. On the clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, 68(1), 33-48.
- Rigollier C., Lefèvre M., Wald L., 2004. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation data from satellite images. *Solar Energy*, 77(2), 159-16.
- Skamarock W. C., 2005. Timesplitting techniques for multidimensional transport, disponível em: [http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/advect3d 2005.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/advect3d%2005.pdf).
- Skamarock W. et al., 2008. A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR, disponível em: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/supports/tutorial.html>.
- Skartveit A., Olseth J. A., 1987. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. *Solar Energy*, 38, 271-274.
- Skartveit A., Olseth J. A., Tuft M., 1998. An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo. *Solar Energy*, 63(3), 173-183.
- SoDa, 2011. Solar Radiation Data Service. Disponível: <http://www.soda-is.com/eng/index.html>
- Stephens G. L., 1978. Radiation profiles in extended water clouds. Part II: Parameterization schemes, *J. Atmos. Sci.*, 35, 2123–2132.
- Stoffel T., Renné D., Myers D., Wilcox S., Sengupta M., George R., Turchi C., 2010. Concentrating Solar Power: Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data (CSP). NREL/TP-550-47465.
- Wong L. T., Chow W. K., 2001. Solar radiation model. *Appl Energy*, 69, 191–224.
- Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., Renne, D., 1999. Effective accuracy of satellite derived hourly irradiances. *Theoretical and Applied Climatology*, 62, 199– 207.